Agroscope Science | Nr. 234 / 2026

Pflanzenschutzoptimierung mit Precision Farming

Schlussbericht des Ressourcenprojektes PFLOPF

Autorinnen und Autoren

Anna Brugger, Andreas Distel, Christian Eggenberger, Martin Holpp, Karia Kögler, Annett Latsch, Elisabeth Lutz, Johannes Ranke, Alexander Zorn

Trägerschaft: Kantone Aargau, Thurgau und Zürich
Wissenschaftliche Begleitung: Agroscope
Projektleitung: Agrofutura

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Agroscope gutes Essen, gesunde Umwelt

Impressum

Herausgeber	Agroscope Schwarzenburgstrasse 161 3003 Bern www.agroscope.ch
Auskünfte	Annett Latsch, annett.latsch@agroscope.admin.ch
Gestaltung	Jacqueline Gabriel
Titelbild	Agroscope
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2026
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as234g

Haftungsausschluss:

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/-innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung **6**
Résumé **7**
Summary **9**
Riassunto **10**
1 Beschreibung des Projekts **12**
1.1 Projekthintergrund 12
1.2 Umgesetzte Massnahmen 12
1.3 Wirkungsziele 12
1.4 Lernziele 14
2 Wirkungsmonitoring und wissenschaftliche Begleitung **14**
2.1 Vorbemerkung 14
2.2 Wissenschaftliche Fragestellungen 14
2.3 Massnahmen, Technologien, Anbaurichtungen und Kulturen 14
2.4 Methodik 16
2.4.1 Methodik ökologisches Wirkungsmonitoring 16
2.4.2 Methodik ökonomische Untersuchungen 17
2.5 Resultate mit Erreichungsgraden 18
2.5.1 Resultate ökologisches Wirkungsmonitoring nach Massnahmen 18
2.5.2 Resultate ökologisches Wirkungsmonitoring nach Anbaurichtungen 24
2.5.3 Resultate ökologisches Wirkungsmonitoring: Zusammenfassung 26
2.5.4 Resultate ökonomische Untersuchungen nach Massnahmen 28
2.5.5 Resultate ökonomische Untersuchungen: Zusammenfassung 30
2.6 Schlussfolgerungen 31
2.6.1 Schlussfolgerungen Ökologie 31
2.6.2 Schlussfolgerungen Ökonomie 32
2.6.3 Weiterer Bedarf an wissenschaftlichen Arbeiten, verbleibende offene Fragen 32
3 Fazit über sechs Projektjahre **33**
4 Anhang 1: Ökologie – Wirkungsmonitoring **35**
4.1 Massnahme 1 – Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen 35
4.1.1 Ackerbau 35
4.1.2 Gemüsebau 38
4.1.3 Obstbau 40
4.1.4 Rebbau 41
4.2 Massnahme 2 – Satellitenbasierte (GPS-) Lenksysteme zur Minimierung der Fahrgassenüberlappung 43
4.3 Massnahme 3 – GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltung 44
4.4 Massnahme 4 – Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik 46
4.5 Massnahme 5 – Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung im Acker- und Gemüsebau 50
4.6 Massnahme 6 – Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau 53
4.7 Massnahme 7 – Drohneneinsatz zur Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster und Abdriftreduktion im Reb- und Obstbau 54

5 Anhang 2: Ökologie – Risikoreduktion 57
5.1 Einleitung 57
5.2 Methoden 57
5.3 Resultate 58
5.3.1 Angepasste Dosierung (M 1) 58
5.3.2 Spot-Spraying F & I (M 4) 62
5.3.3 Spot-Spraying H (M 4) 65
5.3.4 Hacken (M 5) 67
5.3.5 Zusammenfassung der Resultate 72
5.4 Fazit 73
5.5 Ergänzende Informationen 73
5.5.1 Wirkstoffeigenschaften 73
5.5.2 Toxizitätsendpunkte 75
6 Anhang 3: Ökonomie – Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz 83
6.1 Zusammenfassung 83
6.2 Einleitung 84
6.3 Daten und Methoden 84
6.3.1 Literaturanalyse 84
6.3.2 Datenerhebung 84
6.3.3 Verfahrensvergleich 85
6.3.4 Onlineumfrage 86
6.4 Massnahmenübersicht 86
6.5 Prognose- und Monitoringsysteme (M1) 89
6.6 Automatische Lenksysteme (M2) 95
6.7 Teilbreitenschaltung (M3) 98
6.8 Spot-Spraying im Gemüsebau (M4) 102
6.9 Bewuchsspezifische Ausbringung von PSM im Obstbau (M4) 106
6.10 Sensorgesteuertes Hacken (M5) 107
6.11 Roboterbasiertes Mulchen (M6) 110
6.12 Drohnen (M7) 110
6.13 Wahrnehmung der Landwirte von Precision Farming 114
6.14 Fazit 114
6.15 Entwicklungsstand je nach Betriebszweig 116
6.16 Lernfragen 117
6.16.1 Kosten von Precision Farming 117
6.16.2 Nutzen von Precision Farming 117
6.16.3 Kosten-Nutzen-Verhältnis 118
6.17 Ausblick 119
6.18 Ergänzende Informationen 120
6.18.1 Fragebogen für die persönliche Datenerfassung 120
6.18.2 Fragebogen für die Onlinebefragung 121
6.18.3 Annahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse 124

7 Literaturverzeichnis 129
8 Abbildungsverzeichnis 133
9 Tabellenverzeichnis 135

Zusammenfassung

Im Ressourcenprojekt PFLOPF (Pflanzenschutzoptimierung mit Precision Farming) wurde auf knapp 60 landwirtschaftlichen Betrieben mit Acker-, Gemüse-, Obst- und Rebbau unter Praxisbedingungen erhoben, welchen Beitrag Precision Farming Technologien zur Reduktion des Pflanzenschutzmittel (PSM)-Einsatzes leisten können. Das Wirkungsziel war eine Reduktion der PSM-Einsatzmengen in der Summe aller Technologiemassnahmen um mindestens 25 % verglichen mit herkömmlich ohne Precision Farming Technologien behandelten Flächen.

Ökologische Wirkung: Je nach Kultur, Witterungsverlauf und zur Verfügung stehenden Precision Farming Technologien ist eine Reduktion der PSM-Einsatzmengen in der Summe aller Technologiemassnahmen um 25 % möglich, lässt sich aber nicht generell erreichen.

- Im **Acker**-, **Gemüse**- und **Obstbau** lässt sich in **Reihenkulturen** der Herbizideinsatz im Umfang von 50 % bis >80 % reduzieren; Die potenziellen Risiken für aquatische Organismen sinken dadurch im Umfang von 20 % bis >80 %.
- Im **Ackerbau** lässt sich der Fungizideinsatz jahres- und kulturabhängig um 25 % reduzieren.
- Im **Gemüsebau** lässt sich der Fungizid- und Insektizid-Einsatz mit Spot-Applikation um >50 % reduzieren. Die potenziellen Risiken für aquatische Organismen sinken dadurch um <5 % (Fungizide) und >70 % (Insektizide).
- Im **Obst**- und **Rebba**u lässt sich der Einsatz von Fungiziden kaum weitergehend reduzieren. Zuverlässige Prognosetechnologien und Behandlungsempfehlungen stehen zur Verfügung und werden genutzt, sie entsprechen der «herkömmlichen Behandlung». Ein Einsatz von Drohnen führt zu einer Reduktion der Abdrift und der Anwenderexposition, nicht aber zu einer Reduktion der PSM-Einsatzmengen.

Wirtschaftlichkeit und **Akzeptanz** der untersuchten Technologiemassnahmen variieren stark zwischen den Betriebszweigen. Im Ackerbau werden vergleichsweise breit einsetzbare Technologien wie Lenksysteme und Teilbreitenschaltungen häufig genutzt, da sie auch auf mittelgrossen Betrieben wirtschaftlich tragfähig sind, während teurere Technologien wie Spot-Spraying kaum eingesetzt werden. Im Gemüsebau ist die Umsetzung weiter fortgeschritten. Hohe PSM-Kosten, der Ersatz von Handarbeit und die in vielen Kulturen hohe Wertschöpfung begünstigen in diesem Bereich den Einsatz neuer Technologien. Der Obstbau zeigt eine relativ geringe Umsetzung, da hohe Kosten und zusätzlicher Arbeitsaufwand den Nutzen der Technologien einschränken. Im Rebbau sind Drohnen in Steillagen vielversprechend, PSM-Einsparungen bleiben jedoch gering. Der Hauptnutzen liegt im Anwenderschutz und der besseren Zugänglichkeit von Steillagen.

Akzeptanzfördernd wirken über alle Branchen hinweg finanzielle Beiträge wie über Direktzahlungen und die Strukturverbesserungsverordnung, Arbeitsentlastung und Steigerung des Anwenderschutzes.

Akzeptanzhemmend wirken hohe Investitionskosten, fehlendes Wissen für den Umgang mit der Technologie und fehlende Integration in bestehende Prozesse.

Aufrechterhaltung der Wirkung nach Projektende: Bei ausreichender Praxisreife, einfacher Praxishandhabbarkeit und nachvollziehbarem positivem Kosten-Nutzen-Verhältnis werden die Technologien nach Auskunft der Projektbetriebe weitergehend eingesetzt werden. Dies ist bei Lenksystemen, automatischen Teilbreitenschaltungen und Hackgeräten zur Unkrautregulierung zwischen den Reihen der Fall. Alle im Projekt betrachteten Technologien können ohne Weiteres schweizweit genutzt werden. Ein Teil der Technologien ist ohne finanzielle Förderung bei entsprechender Auslastung selbsttragend, ein Teil unter Ausnutzung der Fördermöglichkeiten wie über Direktzahlungen oder die Strukturverbesserungsverordnung (SVV). Einige Technologien, vor allem Systeme für die bewuchsspezifische Ausbringung und Mulchroboter, sind nicht selbsttragend, weil für ihren Einsatz (noch) keine Förderung zur Verfügung steht. Im Bereich der Prognose- und Monitoringsysteme braucht es häufig unterstützendes Expertenknowhow und den regionalen Lead der kantonalen landwirtschaftlichen Beratungszentren, damit die Technologien in der landwirtschaftlichen Praxis Wirkung entfalten können.

Handlungsempfehlungen:

- Die heute im Rahmen der Direktzahlungen und Strukturverbesserungen verfügbaren Förderungen sollten ausgebaut werden, um das Einsparpotential auch jener Precision Farming Technologien nutzen zu können, die sich auf den Betrieben heute noch nicht rentabel einsetzen lassen. Hier handelt es sich vorwiegend um Spot-

Spraying Technologien. Diese Förderungen könnten im Rahmen von Verordnungspaketen und der AP2030+ eingeführt werden.

- Der Betrieb und die Nutzung von Prognose- und Monitoringsystemen sind komplex. Für einen erfolgreichen Einsatz braucht es bis auf Weiteres betriebsexterne, von der PSM-Industrie unabhängige Expertise, damit die Technologien auf den landwirtschaftlichen Betrieben Wirkung entfalten können. Bei Forschungsorganisationen wie Agroscope und bei den landwirtschaftlichen Beratungszentren sollten hierfür entsprechende finanzielle Ressourcen für Personal und Technologie bereitgestellt werden.
- Da die Technologieentwicklung u.a. durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz rasch voranschreitet, sollten sich Forschungsinstitutionen wie Agroscope und landwirtschaftliche Beratungszentren weiterhin koordinieren und Ressourcen bereitstellen, um die Entwicklung von Precision Farming Technologien zielgerichtet verfolgen, beurteilen und Handlungsempfehlungen aussprechen zu können. Grundlagen in diese Richtung bestehen mit der Versuchsstation Smarte Technologien in der Landwirtschaft. Für eine effiziente, schweizweite Bereitstellung von Praxisinformationen sollten die über AGRIDEA verfügbaren Möglichkeiten weitergehend genutzt werden.
- Erfolgversprechende, aber noch nicht praxisreife Technologien wie im Bereich der bewuchsspezifischen Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik oder der roboterbasierten Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau sollten durch geeignete Industriepartner weiterentwickelt werden, wo nötig mit öffentlichen Mitteln aus der Innovationsförderung wie Innosuisse oder QuNaV oder privaten Mitteln wie von Stiftungen. Der Versuchsstation für Smarte Technologien in der Landwirtschaft könnte hier eine federführend-koordinierende Rolle zukommen.

Résumé

Dans le cadre du projet d'utilisation durable des ressources PFLOPF (Optimisation de la protection des plantes grâce à l'agriculture de précision), une étude a été menée dans une soixantaine d'exploitations agricoles spécialisées dans les grandes cultures, les cultures maraîchères, l'arboriculture fruitière et la viticulture, afin de déterminer dans quelle mesure les technologies d'agriculture de précision peuvent contribuer à réduire l'utilisation des produits phytosanitaires (PPh). L'objectif visé était une réduction d'au moins 25 % des quantités de PPh utilisées, toutes mesures technologiques confondues, par rapport aux surfaces traitées de manière conventionnelle, c'est-à-dire sans recours aux technologies d'agriculture de précision.

Impact écologique: En fonction de la culture, des conditions météorologiques et des technologies d'agriculture de précision utilisées, une réduction de 25 % des quantités de produits phytosanitaires appliquées est possible en tenant compte de l'ensemble des mesures technologiques, mais cet objectif ne peut pas être réalisé systématiquement.

- Dans les **grandes cultures**, **les cultures maraîchères** et l'**arboriculture fruitière**, l'utilisation d'herbicides peut être réduite d'environ 50 à plus de 80 % dans les **cultures en rangs**, ce qui réduit les risques potentiels pour les organismes aquatiques d'environ 20 à plus de 80 %.
- Dans **les grandes cultures**, l'utilisation de fongicides peut être réduite de 25 % en fonction de l'année et de la culture.
- Dans les **cultures maraîchères**, l'utilisation de fongicides et d'insecticides peut être réduite de plus de 50 % grâce à la pulvérisation localisée (spot spraying). Les risques potentiels pour les organismes aquatiques diminuent ainsi de plus de 5 % (fongicides) et de plus de 70 % (insecticides).
- Dans l' **arboricuture fruitière** et la **viticulture**, il est pratiquement impossible de réduire davantage l'utilisation de fongicides. Des technologies de prévision fiables et des recommandations de traitement sont disponibles et mises en œuvre; elles correspondent au traitement dit conventionnel. L'utilisation de drones permet de réduire la dérive et l'exposition des utilisateurs, mais pas les quantités de produits phytosanitaires utilisées.

La **rentabilité** et l'**acceptation** des mesures technologiques étudiées varient fortement d'un secteur d'activité à l'autre. En grandes cultures, des technologies comparativement polyvalentes, telles que les systèmes de guidage et la coupure automatisée des tronçons, sont fréquemment utilisées, car elles sont rentables même dans les exploitations de taille moyenne, tandis que les technologies plus coûteuses, comme le spot spraying, sont rarement

mises en œuvre. Dans les cultures maraîchères, l'application des technologies d'agriculture de précision est plus avancée. Les coûts élevés des produits phytosanitaires, le remplacement du travail manuel et la forte valeur ajoutée de nombreuses cultures favorisent l'utilisation de nouvelles technologies dans ce domaine. L' arboriculture fruitière affiche un taux de mise en œuvre relativement faible, car les coûts élevés et la charge de travail supplémentaire limitent les avantages de ces technologies. En viticulture, les drones sont prometteurs sur les terrains en pente, mais les économies de produits phytosanitaires restent faibles. Le principal avantage réside dans la protection des utilisateurs et la meilleure accessibilité des terrains en pente.

Les contributions financières telles que les paiements directs et celles obtenues par le biais de l'ordonnance sur les améliorations structurelles (OAS), l'allègement de la charge de travail et le renforcement de la protection des utilisateurs sont favorables à l'acceptation dans tous les secteurs.

Les coûts d'investissement élevés, le manque de connaissances sur l'utilisation de la technologie et l'absence d'intégration dans les processus existants sont défavorables à l'acceptation.

Poursuite de l'utilisation de la technologie après la fin du projet: L'expérience montre que lorsque les technologies sont suffisamment abouties pour être appliquées dans la pratique, faciles à mettre en place et qu'elles présentent un rapport coûts-bénéfices positif et vérifiable, elles continuent d'être utilisées par les exploitants ayant participé au projet. C'est le cas des systèmes de guidage, de coupure auromatisée des tronçons et des sarcleuses guidées par des capteurs pour lutter contre les mauvaises herbes entre les rangs. Toutes les technologies étudiées dans le cadre du projet peuvent être appliquées sans difficulté dans toute la Suisse. Certaines de ces technologies sont rentables sans aide financière si elles sont exploitées à pleine capacité, d'autres le sont en tirant parti des possibilités de subventions telles que les paiements directs ou de celles de l'ordonnance sur les améliorations structurelles (OAS). Un certain nombre de technologies, notamment les systèmes pour le traitement de la végétation entre les rangées d'arbres et les robots-broyeurs, ne sont pas rentables, car aucune aide n'est (encore) disponible pour leur utilisation. Dans le domaine des systèmes de prévision et de monitoring, l'efficacité de ces technologies dans la pratique agricole repose souvent sur le savoir-faire des experts ainsi que sur le rôle clé joué, à l'échelle régionale, par les centrales cantonales de vulgarisation agricole.

Recommandations d'action:

- Il conviendrait de renforcer les aides actuellement disponibles dans le cadre des paiements directs et des améliorations structurelles afin de pouvoir exploiter le potentiel d'économies des technologies de l'agriculture de précision qui ne peuvent pas être utilisées de manière rentable dans les exploitations. Il s'agit principalement des technologies de pulvérisation localisée (spot spraying). Ces aides pourraient être mises en place dans le cadre de trains d'ordonnances et de la PA 2030+.
- L'exploitation et l'utilisation des systèmes de prévision et de monitoring sont complexes. Pour garantir une utilisation réussie, il reste nécessaire pour l'instant de disposer d'une expertise externe, indépendante de l'industrie des produits phytosanitaires, afin que ces technologies puissent produire leurs effets dans les exploitations agricoles. Il faudrait donc mettre à disposition des institutions de recherche tels qu'Agroscope et les centrales de vulgarisation agricole les ressources financières nécessaires pour le personnel et la technologie.
- Étant donné que les progrès technologiques, notamment grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle, avancent à grands pas, les institutions de recherche tels qu'Agroscope et les centrales de vulgarisation agricole devraient continuer à se coordonner et à mobiliser des ressources afin de pouvoir suivre de manière ciblée le développement des technologies d'agriculture de précision, de les évaluer et de formuler des recommandations. La station d'essais Technologies intelligentes constitue un atout solide dans ce sens. Afin d'assurer une diffusion efficace des informations destinées à la pratique à l'échelle nationale, il conviendrait d'exploiter davantage les possibilités offertes par AGRIDEA.
- Les technologies prometteuses, mais qui ne sont pas encore suffisamment abouties pour une application dans la pratique, telles que l'application de produits phytosanitaires à l'aide de capteurs ou le désherbage avec des robots-broyeurs dans les vergers et les vignobles, devraient être perfectionnées en collaboration avec des partenaires industriels, si nécessaire grâce à des fonds publics provenant de programmes de soutien à l'innovation comme Innosuisse ou QuNaV, ou à des fonds privés provenant par exemple de fondations. La station d'essais Technologies intelligentes pourrait jouer ici un rôle clé dans la coordination.

Summary

On just under 60 farms growing arable crops, vegetables, fruit and grapes, the resource project 'Plant Protection Optimisation with Precision Farming' (PFLOPF) conducted field tests to determine what contribution Precision Farming technologies could make to reducing PPP use. The outcome objective was a reduction of at least 25% in the amounts of PPPs used across all technological measures compared with areas treated conventionally, i.e. without the use of Precision Farming technologies.

Ecological impact: Depending on the crop, weather pattern and available Precision Farming technologies, a 25% reduction in the amounts of PPPs used across all technological measures is possible, but not generally achievable.

- In **arable, vegetable** and **fruit production**, herbicide use can be reduced in **row crops** by 50 to >80%; this lowers potential risks for aquatic organisms by 20 to >80%.
- In **arable crops**, fungicide use can be reduced by 25%, depending on the year and crop.
- In **vegetable crops**, fungicide and insecticide use can be reduced by >50% with the use of spot-spraying. This lowers potential risks for aquatic organisms by <5% (for fungicides) and >70% (for insecticides).
- In **fruit production** and **viticulture**, the scope for further reductions in fungicide use is very small. Reliable forecasting technologies and treatment recommendations are available and are used, and represent the 'conventional treatment'. Using drones leads to a reduction in drift and user exposure, but not to a reduction in the amounts of PPPs used.

Cost-effectiveness and **acceptance** of the technological measures examined vary greatly among different types of farming. In arable farming, comparatively general-purpose technologies such as steering systems and section control are frequently used, since they are economically viable even on medium-sized farms, whilst costly technologies such as spot-spraying are seldom used. Implementation has progressed further in vegetable crops. High PPP costs, the replacement of manual labour and the high value-added in many crops favour the use of new technologies in this sector. Implementation in fruit farming is relatively low, since high costs and additional workload limit the benefits of the technologies. In viticulture, although drones are showing great promise on steep slopes, PPP savings remain low. The main benefit is in user protection and better accessibility of steep slopes.

Acceptance is promoted in all activities by financial contributions such as direct payments and the Ordinance on Structural Improvement, workload reduction and enhanced user protection.

Acceptance is stymied by high investment costs, a lack of knowledge of how to handle the technology, and a lack of integration into existing processes.

Maintaining the impact once the project ends: Where there is sufficient practical applicability, easy manageability in practice and a clear, positive cost-benefit ratio, experience shows that the technologies continue to be used by the project farms. This is the case with steering systems, automatic section control and hoeing devices for inter-row weed control. All of the technologies considered in the project can easily be used throughout Switzerland. With appropriate utilisation, some of the technologies are self-supporting without financial funding, whilst some need to make full use of funding sources such as direct payments or the Structural Improvement Ordinance (SVV) to pay their way. Some technologies, particularly systems for vegetation-specific application and mulching robots, are not self-supporting, since no assistance is (yet) available for their use. With forecasting and monitoring systems, supporting expertise and the regional lead of the cantonal agricultural extension centres are frequently required to maximise the impact of the technologies in agricultural practice.

Recommendations for action:

- The subsidies currently available as part of the direct payments and structural improvements should be expanded in order to make use of the savings potential of those Precision Farming technologies which cannot yet be deployed profitably on the farms. This applies primarily to spot-spraying technologies. These subsidies could be introduced as part of Ordinance packages and the WP2030+.
- Operating and using forecasting and monitoring systems is a complex matter. For the time being, their successful use requires off-farm expertise that is independent of the PPP industry in order for the technologies to have an

impact on the farms. The appropriate financial resources for staff and technology should be made available for this at research organisations such as Agroscope as well as at the agricultural extension centres.

- Given the rapid pace of technological progress, partly thanks to the use of AI, research institutions such as Agroscope and agricultural extension centres should continue to coordinate their efforts and allocate resources to systematically monitor and assess the development of Precision Farming technologies and issue recommendations for action. The Experimental Station for Smart Technologies in Agriculture has already laid the foundations for this. Greater use should be made of the facilities made available through AGRIDEA to ensure the efficient provision of practical information throughout Switzerland.
- Promising technology that is not yet ready for use in practice, such as the vegetation-specific application of plant protection products with sensor technology or robot-based weed control in fruit production and viticulture, should be further developed by suitable industrial partners, where necessary with public resources from innovation-promoting agencies such as Innosuisse or companies such as QuNav, or private funding from foundations. The Experimental Station for Smart Technologies in Agriculture could assume a leading and coordinating role here.

Riassunto

Nell'ambito del progetto sulle risorse PFLOPF (Pflanzenschutzoptimierung mit Precision Farming) è stato valutato il contributo fornito dalle tecnologie per l'agricoltura di precisione nella riduzione dell'impiego di prodotti fitosanitari (PF). Lo studio è stato condotto in condizioni empiriche in circa 60 aziende agricole che si occupano di campicoltura, orticoltura, frutticoltura e viticoltura. L'obiettivo era una riduzione di almeno il 25 % nei quantitativi di prodotti fitosanitari utilizzati, considerando le misure tecnologiche nel loro insieme e il paragone con superfici trattate in modo convenzionale, ovvero senza ricorrere alle tecnologie per l'agricoltura di precisione.

Impatto ecologico: a seconda della coltura, delle condizioni meteorologiche e delle tecnologie per l'agricoltura di precisione disponibili, è possibile ottenere una riduzione del 25 % nelle quantità di prodotti fitosanitari utilizzate, considerando le misure tecnologiche adottate nel loro insieme, ma tale risultato non è garantito in tutti i casi.

- Nelle **colture a filari** in **campicoltura, orticoltura e frutticoltura**, è possibile ridurre l'uso di erbicidi dal 50 a oltre l'80 %; i potenziali rischi per gli organismi acquatici diminuiscono così dal 20 a oltre l'80 %.
- In **agricoltura** è possibile ridurre l'uso di fungicidi del 25 %, in funzione dell'annata e della coltura.
- In **orticoltura**, l'impiego di fungicidi e insetticidi può essere ridotto di oltre il 50 % grazie a trattamenti mirati tramite lo spot spraying. I potenziali rischi per gli organismi acquatici scendono così del 5 % (fungicidi) e di oltre il 70 % (insetticidi).
- In **frutticoltura** e **viticoltura** è praticamente impossibile ridurre ulteriormente l'uso di fungicidi. Sono disponibili e vengono utilizzate tecnologie di prognosi affidabili e raccomandazioni per il trattamento, che corrispondono al «trattamento convenzionale». L'impiego di droni comporta una riduzione della deriva dei trattamenti e dell'esposizione dell'utilizzatore, ma non una diminuzione nelle quantità di prodotti fitosanitari utilizzati.

La **redditività** e l'**accettazione** delle misure tecnologiche prese in esame variano notevolmente in funzione dei rami del settore. In campicoltura si ricorre spesso a tecnologie relativamente versatili, come i sistemi di guida e di controllo dei settori, poiché risultano economicamente sostenibili anche per le aziende di medie dimensioni, mentre vengono utilizzate raramente opzioni più costose come lo spot spraying. In orticoltura, l'applicazione è a uno stadio più avanzato. I costi elevati dei prodotti fitosanitari, la sostituzione del lavoro manuale e l'elevato valore aggiunto in molte colture favoriscono l'impiego di nuove tecnologie nel settore. L'applicazione in frutticoltura è relativamente bassa, poiché i costi elevati e l'ulteriore mole di lavoro limitano i vantaggi offerti dalle tecnologie. In viticoltura, l'uso dei droni sulle zone in forte pendenza è promettente, ma il risparmio di prodotti fitosanitari rimane modesto. Il vantaggio principale che offre consiste nella protezione dell'utilizzatore e nella maggiore raggiungibilità dei terreni in pendenza.

In tutti i settori, contributi finanziari quali i pagamenti diretti e l'ordinanza sui miglioramenti strutturali, la diminuzione della mole di lavoro e l'aumento della protezione degli utilizzatori contribuiscono a favorire l'adozione di tali misure.

A ostacolarne l'adozione sono invece gli elevati costi d'investimento, la mancanza di competenze tecniche e la scarsa integrazione nei processi esistenti.

Risultati perduranti dopo la fine del progetto: se le tecnologie presentano un'applicabilità pratica sufficiente, un utilizzo semplice e un rapporto costi-benefici positivo, l'esperienza dimostra che le aziende coinvolte nel progetto continueranno a usarle. Questo vale per i sistemi di guida e di controllo dei settori, così come le sarchiatrici interfila per la regolazione delle erbe infestanti. Tutte le tecnologie prese in esame nell'ambito del progetto possono essere facilmente adottate in territorio svizzero. Una parte di esse è in grado di autofinanziarsi senza sovvenzioni, a condizione che venga utilizzata a pieno regime; un'altra parte, invece, si avvale delle possibilità di finanziamento offerte, ad esempio, dai pagamenti diretti o dall'ordinanza sui miglioramenti strutturali (OMSt). Alcune tecnologie, in particolare i sistemi di applicazione specifici per le colture e i robot per la pacciamatura, non sono autosufficienti dal punto di vista economico, poiché non sono (ancora) disponibili incentivi per il loro impiego. Nell'ambito dei sistemi di previsione e monitoraggio, è spesso necessario avvalersi delle competenze specialistiche e, a livello regionale, della guida dei centri di consulenza agricola cantonali per assicurarsi che le tecnologie diano i loro frutti nella pratica.

Raccomandazioni pratiche:

- Le sovvenzioni attualmente disponibili nell'ambito dei pagamenti diretti e dei miglioramenti strutturali dovrebbero essere ulteriormente sviluppate per poter sfruttare il potenziale di risparmio offerto anche da quelle tecnologie per l'agricoltura di precisione che oggi non possono ancora essere impiegate nelle aziende agricole in modo redditizio. Si tratta prevalentemente degli strumenti per lo spot spraying. Tali incentivi potrebbero essere introdotti nell'ambito di pacchetti di ordinanze e della PA2030+.
- Il funzionamento e l'utilizzo dei sistemi di previsione e monitoraggio sono complessi. Al momento è ancora necessario avvalersi di competenze esterne all'azienda e indipendenti dall'industria dei PF per garantire un impiego riuscito delle tecnologie e ottenere un effetto nelle aziende agricole. Le organizzazioni di ricerca come Agroscope e i centri di consulenza agricola dovrebbero quindi disporre di risorse finanziarie adeguate per il personale e le tecnologie.
- Poiché lo sviluppo tecnologico progredisce rapidamente, ad esempio attraverso l'uso dell'intelligenza artificiale, gli istituti di ricerca come Agroscope e i centri di consulenza agricola dovrebbero continuare a coordinarsi e a fornire risorse per monitorare in modo mirato e valutare lo sviluppo delle tecnologie di agricoltura di precisione, formulando infine raccomandazioni pratiche. A tal fine è stata già posta una base con la fondazione della stazione sperimentale Tecnologie intelligenti nell'agricoltura. Inoltre, si dovrebbe ricorrere maggiormente alle possibilità offerte da AGRIDEA per fornire in modo efficiente informazioni pratiche a livello nazionale.
- Tecnologie promettenti ma non ancora applicabili nella pratica, come l'uso mirato, in funzione della coltura, di prodotti fitosanitari tramite sensori o la regolazione robotizzata alle erbe infestanti in frutticoltura e viticoltura, dovrebbero essere perfezionate da partner industriali adeguati ricorrendo, se necessario, a fondi pubblici per la promozione dell'innovazione come Innosuisse oppure OQuSo, o a fondi privati, stanziati ad esempio da fondazioni. In tale contesto, la stazione sperimentale Tecnologie intelligenti nell'agricoltura potrebbe assumere un ruolo di guida e coordinamento.

1 Beschreibung des Projekts

1.1 Projekthintergrund

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) hat in den letzten Jahren zu Emissionen in die Gewässer geführt. Trotz abnehmender Landwirtschaftsfläche stagniert der Einsatz von PSM seit 2007 auf hohem Niveau. Das Ressourcenprojekt PFLOPF setzt auf technologiebasierte Massnahmen zur Optimierung und Reduktion des PSM-Einsatzes.

Die Belastung von Gewässern und Nicht-Ziel-Organismen mit Rückständen von PSM zeigt Handlungsbedarf auf. Der Nationale Aktionsplan Pflanzenschutz strebt eine Optimierung und Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes an. Technologien zur präzisen Landbewirtschaftung (Precision Farming) wie satelliten- und sensorgesteuerte Traktoren, Pflanzenschutz- und Hackgeräte, Drohnen und Pflanzenschutz-Prognosesysteme bieten grosses Potenzial, den PSM-Einsatz zu senken. Die landwirtschaftliche Praxis nutzt diese Technologien aufgrund verfahrenstechnischer, arbeitswirtschaftlicher und ökonomischer Hindernisse bis anhin aber kaum. Für den Einsatz von Precision Farming Technologien sind oft hohe Investitionen und ein vertieftes Anwendungswissen nötig.

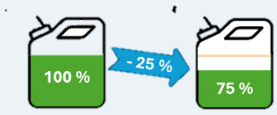
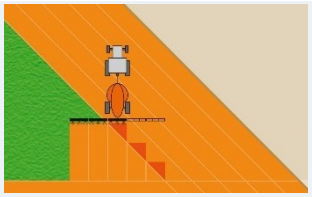
1.2 Umgesetzte Massnahmen

Im Rahmen des Projektes (Laufzeit 2019–2024, Wirkungsmonitoring bis 2026) haben 58 Landwirtschaftsbetriebe mit Acker-, Gemüse-, Obst- und Rebbau in den Kantonen Aargau, Thurgau und Zürich betriebliche und begleitende Massnahmen umgesetzt. Unter den betrieblichen Massnahmen kamen sieben verschiedene Precision Farming Technologien zum Einsatz (vgl. Tabelle 1). Begleitende Massnahmen sollten den Einsatz dieser Precision Farming Technologien mittels Beratung und Information fördern.

1.3 Wirkungsziele

Ziel des Projektes war es, die Hürden für den Einsatz von am Markt verfügbaren Precision Farming Technologien zu verkleinern und die Nützlichkeit und Anwendbarkeit der Technologien unter Schweizer Verhältnissen aufzuzeigen. Über die Summe aller Massnahmen sollten ohne Beeinträchtigung des quantitativen und qualitativen Ertragsniveaus 25 % PSM-Mengen weniger eingesetzt werden als auf einer herkömmlich behandelten Fläche. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die im Projekt eingesetzten Technologiemassnahmen und die angestrebten Wirkungsziele.

Tabelle 1: Massnahmen, Teilnahmeumfang und Wirkungsziele.

	Technologiemassnahme	Wirkungsziel
	Oberziel	
	Summe der Wirkung auf die Reduktion des PSM-Einsatzes der einzelnen Massnahmen M1-M7 in Kombination	Im Vergleich zu herkömmlich behandelten Flächen der Betriebe sind die PSM-Einsatzmengen in der Summe aller Massnahmen um mindestens 25 % reduziert.
	Einzelziele	
	M1: Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen durch Sensoren und Kommunikationssysteme (58 Betriebe)	15 % weniger Fungizid- und Insektizidbehandlungen durch optimierte Pflanzenschutzplanung im Acker-, Gemüse-, Obst- und Rebbau
	M2: Satellitenbasierte Lenksysteme (36 Betriebe)	-3 % PSM-Ausbringmenge durch Reduktion der Fahrgassenüberlappung im Acker- und Gemüsebau
	M3: GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit automatischer Teilbreitenschaltung (33 Betriebe)	-2 % PSM-Ausbringmenge durch Minimierung der Spritzüberlappungen in Randzonen nicht rechteckiger Felder im Acker- und Gemüsebau
	M4: Bewuchsspezifische Applikation von PSM mit Sensortechnik (6 Betriebe)	-50 % PSM-Ausbringmenge durch Umstellung von ganzflächiger Applikation auf eine bewuchsspezifische Behandlung im Acker-, Gemüse-, Obst- und Rebbau
	M5: Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung (19 Betriebe)	-70 % Herbizid-Anwendungen in Reihenkulturen im Acker- und Gemüsebau
	M6: Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung (1 Betrieb)	-70 % Herbizid-Anwendungen im Unterstockbereich von Obst und Reben
	M7: Drohneneinsatz zur Abdriftreduktion und Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster (5 Betriebe)	-30 % PSM-Ausbringmenge im Steillagen-Rebbau und Hochstamm-Obstbau

1.4 Lernziele

1. Es sind Erkenntnisse gewonnen, wie und in welchem Umfang durch den Einsatz der Precision Farming Technologien die gewünschten Wirkungen bezüglich einer Reduktion des PSM-Einsatzes erreicht wurden. Es ist bekannt, welche Bereiche, wie z. B. Anwendungsfreundlichkeit, Technikzugang und Wirtschaftlichkeit, noch optimiert werden müssen.
2. Es ist bekannt, wie relevante Einflussgrössen eines Technologieeinsatzes, zum Beispiel Zugang zur Technik oder Anwendungsunterstützung, so gestaltet werden, dass die landwirtschaftliche Praxis technologische Möglichkeiten nicht nur vom Hörensagen her kennt, sondern gezielt die Möglichkeiten umsetzt, den Einsatz beibehält und langfristig von den positiven Auswirkungen profitiert.

2 Wirkungsmonitoring und wissenschaftliche Begleitung

2.1 Vorbemerkung

Dieses Kapitel zeigt fokussiert die Ergebnisse aus der Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen zum Einsatz der sieben Technologiemassnahmen (M1-M7). Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur ökologischen Wirkung sind aufgeführt. Für einzelne Massnahmen (M1, M4, M5) wurde auch ermittelt, wie sich durch den verringerten PSM-Einsatz das Risiko für Gewässerorganismen verändert; die Berechnungen und Ergebnisse zur Risikoreduktion sind hier in Auszügen enthalten. Ebenso werden die wichtigsten Erkenntnisse zur Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz jeder Massnahme dargelegt.

Im Anhang (Kapitel 4, 5 und 6) sind ausführliche Detailinformationen bezüglich Methodik, Ergebnissen, Diskussionen und Schlussfolgerungen zu den ökologischen Auswirkungen, zur Risikoreduktion und zur Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz enthalten. In diesem Kapitel sind Verweise zu den entsprechenden Passagen gesetzt.

2.2 Wissenschaftliche Fragestellungen

Die drei im Projektgesuch formulierten wissenschaftlichen Fragestellungen leiten sich aus den Wirkungszielen (Kapitel 1.3) und Lernzielen (Kapitel 1.4) ab.

- Ökologische Wirkung: Wieviel PSM konnten durch den Einsatz von Precision Farming Technologien im Vergleich zu herkömmlicher Bewirtschaftung eingespart werden? Wie ist die Qualität des Pflanzenschutzes im Vergleich zu herkömmlicher Bewirtschaftung? Wie kann mit Precision Farming Technologien ein standortspezifisch angepasster Pflanzenschutz umgesetzt werden?
- Wirtschaftlichkeit: Welche Kosten werden durch den Einsatz von Precision Farming Technologien verursacht? Welcher Nutzen entsteht? Welches Kosten-Nutzen-Verhältnis besteht?
- Akzeptanz: In welchem Umfang wurde mit den Projektmassnahmen erreicht, dass Precision Farming Technologien von den Betrieben angenommen und eingesetzt werden? Was funktionierte gut, wo besteht weiterer Verbesserungsbedarf, um die Praxisakzeptanz zu erhöhen? Welche Herausforderungen bestehen für den Landwirt? Welche Rolle spielen die verschiedenen Akteure (insbesondere öffentliche Beratung, Beratung durch Landmaschinenfirmen und durch Lohnunternehmen) bei der Umsetzung von Precision Farming Technologien? Wie lassen sich die Möglichkeiten für den Einsatz von Precision Farming Technologien in der gesamten Schweiz beurteilen?

2.3 Massnahmen, Technologien, Anbaurichtungen und Kulturen

Tabelle 2 zeigt, in welchen Massnahmen welche Technologien in welchen Anbaurichtungen und Kulturen zum Einsatz kamen und untersucht wurden. Unter der Tabelle sind die Massnahmen beschrieben.

Tabelle 2: Einsatz der sieben Technologiemassnahmen (M1–M7) in verschiedenen Kulturen. Angaben in Klammern wurden bei der Auswertung auf Grund des geringen Flächenumfangs nicht berücksichtigt.

	Ackerbau					Gemüsebau					
	Weizen	Zuckerrüben	Mais	Kartoffeln	Raps	Salat	Zwiebeln	Karotten	Kohl	Obst	Reben
M1: Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen											
- Prognosemodelle	x	x		(x)			x	x		x	x
- Wetterstationen	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
- Kamerafallen					x			x	x	x	
- Datenplattform	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
M2: GPS-Lenksysteme zur Reduktion der Fahrgassenüberlappung	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
M3: GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreitenschaltung	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
M4: Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik											
- Spot-Spraying Herbizid		x					x				
- Spot-Spraying F+I						x					
- Laubwandabgepasste Ausbringmenge										x	x[1)]
- Punktspritzung										x	
M5: Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung in Reihenkulturen		x	x	(x)	(x)	x	(x)	x	x		
M6: Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung										x	
M7: Drohneneinsatz zur Abdriftreduktion und Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster											x

[1)] *Im Rebbau wurde das theoretische Einsparpotential für die Umsetzung einer Dosierung nach Laubwandvolumen auf allen Parzellen eines Betriebes ermittelt.*

Massnahme 1 – Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen

Die Betriebe bekommen über einen elektronischen Kommunikationskanal (Internet, App, E-Mail) ein Pflanzenschutzbulletin mit betriebsspezifischen Behandlungsempfehlungen, basierend auf Feldbonituren und Prognosemodellen. Bei Bedarf werden vor Ort Wetterstationen, Bodenfeuchtesensoren oder Schädlingsfallen installiert, um die Empfehlungen für Fungizid- und Insektizidbehandlungen zu verbessern.

Massnahme 2 – Satellitenbasierte (GPS-) Lenksysteme zur Minimierung der Fahrgassenüberlappung

In Acker- und Gemüsekulturen werden Saat und Pflanzung mit hochpräzisen GPS-Lenksystemen (Genauigkeit +/- 2,5 cm; GPS = Globales Positionierungssystem) durchgeführt und die Pflegefahrgassen exakt im Abstand der Arbeitsbreite des Pflanzenschutzgerätes angelegt. So können Doppelspritzungen durch Arbeitsbreitenüberlappung weitgehend vermieden werden.

Massnahme 3 – GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltung

Das Ein- und Ausschalten der Teilbreiten oder Einzeldüsen erfolgt bei diesen Pflanzenschutzspritzen nicht manuell, sondern automatisch über ein GPS-Signal. So werden Doppelspritzungen durch Überlappungen insbesondere im Vorgewende und Randbereich der Felder minimiert.

Massnahme 4 – Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erfolgt heute in der Regel ganzflächig ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Bewuchses. Neue Sensortechnik und die rasante Entwicklung im Bereich der künstlichen Intelligenz machen es jedoch möglich, die Ausbringung an den Pflanzenbewuchs anzupassen und dadurch die Menge an PSM zu reduzieren. Das Spot-Spraying von Einzelpflanzen im Acker- und Gemüsebau bietet besonders viel Potential. Maschinelles Lernen hat hier zum Durchbruch geführt, da es die Erkennung der Pflanzen in Echtzeit erlaubt. Für den Obst- und Rebbau gibt es Pflanzenschutzgeräte mit Blattwanddetektion und entsprechend gesteuerter An- und Abschaltung der Düsen. Der Herbizideinsatz kann durch die Verwendung einer Punktspritze im Stammbereich der Bäume reduziert werden.

Massnahme 5 – Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung im Acker- und Gemüsebau

In Reihenkulturen im Acker- und Gemüsebau werden durch GPS oder Kameras gesteuerte Hackgeräte verwendet, um Flächenspritzungen mit Herbiziden zu reduzieren oder ganz zu vermeiden. Das Hacken mit einem GPS-gelenkten Traktor nach geradliniger Aussaat der Kultur erfolgt ausschliesslich zwischen den Reihen. Sensorgesteuertes Hacken ist je nach Gerät auch innerhalb der Reihen möglich.

Massnahme 6 – Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau

Der Einsatz von autonom arbeitenden Mährobotern anstelle von Mulchgeräten und Unterstockräumern soll den Arbeitszeitaufwand für die alternative Beikrautregulierung in Obst- und Rebanlagen verringern und diese als Alternative zum Herbizideinsatz im Baumstreifen attraktiver machen.

Massnahme 7 – Drohneneinsatz zur Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster und Abdriftreduktion im Reb- und Obstbau

Mit dem Einsatz von Drohnen werden in Rebbau-Steillagen und Hochstamm-Obstbau-Anlagen die Behandlungen zum optimalen Zeitpunkt und mit reduzierter Abdrift durchgeführt.

2.4 Methodik

Die Methoden für das ökologische Wirkungsmonitoring und die ökonomischen Untersuchungen sind hier in überblickender Form aufgeführt. Die Anhänge mit Detailinformationen sind verlinkt.

2.4.1 Methodik ökologisches Wirkungsmonitoring

Das Wirkungsmonitoring umfasst die wissenschaftlichen Fragestellungen zur ökologischen Wirkung. Die Methodik ist hier im Überblick beschrieben, im Detail findet sie sich in Kapitel 4 Anhang 1: Ökologie – Wirkungsmonitoring sowie in Kapitel 5, Anhang 2: Ökologie – Risikoreduktion.

Massnahme 1 – Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen

- Im **Ackerbau** Auswertung der Daten folgender Technologien: Internetbasierte PFLOPF-Plattform befallsrisiko.ch, in der Landwirte und Beratungspersonen relevante Felder mit Kulturen, Flächendaten, Befallserhebungen und durchgeführten Pflanzenschutzbehandlungen erfassten. In die Plattform eingebunden wurden verschiedene Prognosemodelle zur Vorhersage von Krankheiten bei Winterweizen, Zuckerrüben und Kartoffeln sowie Daten von lokalen, auf den Projektbetrieben platzierten Wetterstationen. In Raps kamen zum Schädlingsmonitoring digitale Gelbschalen mit Kameramodul und internetbasierter Datenfernübertragung zum Einsatz; WhatsApp Chatgruppen.
- Im **Gemüsebau** Auswertung der Daten folgender Technologien: Krankheitsmodelle verschiedener Kulturen in Verbindung mit lokalen und Meteo-Schweiz-Wetterstationen; verschiedene Kamerafallen; internetbasierte PFLOPF-Plattform befallsrisiko.ch mit WhatsApp Push-Service für Landwirte; WhatsApp Chatgruppen.
- Im **Obstbau** Auswertung der Daten folgender Technologien: Wetterstationen mit diversen Sensoren und Krankheitsmodellen; verschiedene Kamerafallen; WhatsApp Chatgruppen.
- Im **Rebbau** Auswertung der Daten folgender Technologien: Laubwandvolumen-Modell von Agrometeo, verschiedene Wetterstationen mit diversen Sensoren; Krankheitsmodelle von Vitimeteo und verschiedene alternative Prognosemodelle. Zudem Ermittlung der Risiken für Organismen in Oberflächengewässern.

Massnahme 2 – Satellitenbasierte (GPS-) Lenksysteme zur Minimierung der Fahrgassenüberlappung

- Vergleich der Arbeitsbreitenüberlappung mit und ohne Lenksystem.
- Digitale Vermessung von Fahrgassenabständen in aktuellen Drohnenfotos von PFLOPF-Parzellen sowie in Luftbildern dieser Parzellen aus der Zeit vor dem Lenksystemeinsatz.

Massnahme 3 – GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltung

- Vergleich der überlappenden Fläche bei Handschaltung und automatischer Schaltung. Der Fahrweg der Spritze und die Aktivität der Düsen wurden mit einem hochpräzisen GPS (Genauigkeit +/-2,5 cm) auf dem Spritzbalken und mit Ultraschallsensoren vor den Spritzdüsen aufgezeichnet und mit einem GIS-Modell ausgewertet.

Massnahme 4 – Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik

- **Spot-Spraying Acker- und Gemüsebau**: Die Aktivität einzelner Düsen anhand der Schaltung der Magnetventile wurde aufgezeichnet und ausgewertet.
- Zusätzlich wurde die Veränderung der potenziellen Risiken für Organismen in Oberflächengewässern betrachtet.
- **Automatische Anpassung der Applikationsmenge an das Laubwandvolumen im Obstbau**: Die Sensorinformationen wurden aufgezeichnet und ausgewertet.
- **Punktspritzung von Herbiziden im Obstbau**: Die behandelten Bereiche wurden ausgemessen und ausgewertet.

Massnahme 5 – Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung im Acker- und Gemüsebau

- Es wurden die Flächenspritzungen, Bandspritzungen und Hackdurchgänge inklusive der bei den Spritzungen verwendeten Herbizide und Aufwandmengen erhoben und nach Kulturen ausgewertet.
- Zusätzlich wurde die Veränderung der potenziellen Risiken für Organismen in Oberflächengewässern betrachtet.

Massnahme 6 – Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau

- Es wurde die PSM-Einsparung in den Varianten ganzflächiges Mulchen sowie Mulchen in den Fahrgassen kombiniert mit Herbiziden bzw. Fadenmäher erhoben.

Massnahme 7 – Drohneneinsatz zur Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster und Abdriftreduktion im Reb- und Obstbau

- Es wurde eine Wirkungsbonitur von mittels Drohne und mit einem herkömmlichen Sprühgerät behandelten Flächen sowie einer unbehandelten Kontrollfläche durchgeführt.
- Zusätzlich wurden Belagsmessungen zur Benetzungsbeurteilung durchgeführt.

2.4.2 Methodik ökonomische Untersuchungen

Die ökonomischen Untersuchungen umfassen die wissenschaftlichen Fragestellungen zu Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz. Die Methodik ist hier im Überblick beschrieben, im Detail findet sie sich in Kapitel 6 Anhang 3: Ökonomie – Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz

Massnahme 1 – Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von standortspezifischen Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen basiert auf Befragungen der Betriebe, sowohl persönlich als auch mittels einer Onlinebefragung.

Massnahme 2 – Satellitenbasierte (GPS-) Lenksysteme zur Minimierung der Fahrgassenüberlappung

Die Wirtschaftlichkeit von Lenksystemen wird anhand eines Verfahrensvergleichs (Traktor ohne gegenüber einem Traktor mit Lenksystem) im Ackerbau verglichen. Die Analyse stützt sich dabei auf einen durchschnittlich grossen spezialisierten Betrieb vom Typ Ackerbau mit einer offenen Ackerfläche von 32,5 ha. Zusätzlich wurden die Landwirte (im Projekt PFLOPF waren durchweg männliche Betriebsleitende beteiligt) persönlich und mittels Onlinefragebogen zu ihren Erfahrungen und Einschätzungen befragt.

Massnahme 3 – GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltung

Die Wirtschaftlichkeit von automatischen Teilbreitenschaltungen wird anhand eines Verfahrensvergleichs im Ackerbau beurteilt. Die Analyse stützt sich dabei auf den o. g. durchschnittlich grossen spezialisierten Ackerbaubetrieb. Zusätzlich wurden die Landwirte persönlich und mittels Onlinefragebogen befragt.

Massnahme 4 – Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik

Im **Gemüsebau** wurden zwei Verfahren betrachtet: die Unkrautbehandlung mittels Spot-Spraying in Zwiebeln sowie die Spot-Behandlung von Eisbergsalat mit Fungiziden und Insektiziden. Die Wirtschaftlichkeit wurde jeweils anhand eines Verfahrensvergleichs je Hektar Kulturfläche verglichen. Zusätzlich wurden die Landwirte persönlich und mittels Onlinefragebogen befragt.

Die beiden im **Obstbau** umgesetzten Massnahmen der bewuchsspezifischen Applikation von PSM mittels Sensorschaltung konnten nicht im Detail untersucht werden, da sie jeweils nur von einzelnen Betrieben umgesetzt wurden und keine repräsentative Aussage möglich wäre.

Massnahme 5 – Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung im Acker- und Gemüsebau

Die Wirtschaftlichkeit von drei Hackverfahren wird anhand eines Verfahrensvergleichs mit der Flächenspritzung im Ackerbau verglichen. Die Analyse stützt sich dabei auf den o. g. durchschnittlich grossen spezialisierten Ackerbaubetrieb. Zusätzlich wurden die Landwirte persönlich und mittels Onlinefragebogen befragt.

Massnahme 6 – Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau

Die im Obstbau von einem Betrieb umgesetzte Massnahme der roboterbasierten Beikrautregulierung konnte nicht im Detail beurteilt werden. Einerseits gab es technische Probleme mit dem Gerät, andererseits war es kein Seriengerät, welches bereits regulär marktverfügbar gewesen wäre.

Massnahme 7 – Drohneneinsatz zur Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster und Abdriftreduktion im Reb- und Obstbau

Die Wirtschaftlichkeit von Drohnen für die Ausbringung von PSM in Reben wurde anhand eines Verfahrensvergleichs und durch Befragungen analysiert.

2.5 Resultate mit Erreichungsgraden

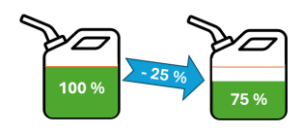
Die Resultate für das ökologische Wirkungsmonitoring und die ökonomischen Untersuchungen sind hier in überblickender Form aufgeführt. Detailresultate und die Resultatdiskussion finden sich in Anhang 1: Ökologie – Wirkungsmonitoring, Anhang 2: Ökologie – Risikoreduktion und Anhang 3: Ökonomie – Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz.

Im Folgenden werden die erzielten Einsparungen aus zwei Blickwinkeln aufgeführt. Einerseits nach Technologiemassnahmen geordnet und in Anbaurichtungen und PSM-Einsatzgebiet unterteilt. Dies ermöglicht eine Beurteilung des Einsparpotentials der Massnahmen. Andererseits nach Anbaurichtungen geordnet und dann in Massnahmen und PSM-Einsatzgebiet unterteilt aufgeführt. Dies ermöglicht eine Darstellung nach erreichten Einsparungen in den verschiedenen Anbaurichtungen bzw. Ackerbaukulturen.

2.5.1 Resultate ökologisches Wirkungsmonitoring nach Massnahmen

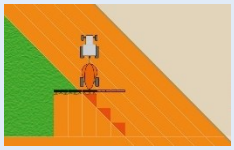
In Tabelle 3 sind die erzielten Einsparungen und Risikoreduktionen nach Massnahmen und Anbaurichtungen aufgeführt. Bei grün hinterlegten Feldern wurden die Wirkungsziele erreicht bzw. überschritten, bei braun hinterlegten Feldern wurden sie unterschritten. Bei weiss hinterlegten Feldern trafen die Massnahme bzw. das PSM-Anwendungsgebiet (Herbizide/Fungizide/Insektizide) nicht zu.

Tabelle 3: Wirkungsziele und erzielte Einsparungen nach Massnahmen und Anbaurichtungen. Bei grün hinterlegten Feldern wurden die Wirkungsziele erreicht bzw. überschritten, bei braun hinterlegten Feldern wurden sie unterschritten. Bei weiss hinterlegten Feldern trafen die Massnahme bzw. das PSM-Anwendungsgebiet (Herbizide/Fungizide/Insektizide) nicht zu.

M1-7 in Kombination 	**Wirkungsziel** Allgemeine Reduktion der PSM-Einsatzmengen auf den teilnehmenden Betrieben ➔ **Im Vergleich zu herkömmlich behandelten Flächen der Betriebe sind die PSM-Einsatzmengen in der Summe aller Massnahmen um mindestens 25 % reduziert** **Fazit** ➔ Im **Acker**-, **Gemüse**- und **Obstbau** ist je nach Anbaurichtung, Kultur und PSM-Anwendungsgebiet eine Reduktion der PSM-Einsatzmengen um mindestens 25 % möglich ➔ Im **Acker**-, **Gemüse**- und **Obstbau** lässt sich in **Reihenkulturen** der Herbizideinsatz in der Bandbreite von 50 % bis >80 % reduzieren. Die potenziellen Risiken für aquatische Organismen sinken dadurch in der Bandbreite von 20 % bis >80 % ➔ Im **Ackerbau** lässt sich der Fungizideinsatz jahres- und kulturabhängig um 25 % reduzieren. ➔ Im **Gemüsebau** lässt sich der Fungizid- und Insektizid-Einsatz mit Spot-Applikation um >50 % reduzieren. Die potenziellen Risiken für aquatische Organismen sinken dadurch um <5 % (Fungizide) und >70 % (Insektizide). ➔ Im **Obst**- und **Rebba**u lässt sich der Einsatz von Fungiziden kaum weitergehend reduzieren. Zuverlässige Prognosetechnologien und Behandlungsempfehlungen stehen zur Verfügung und werden genutzt, sie entsprechen der «herkömmlichen Behandlung». Ein Einsatz von Drohnen führt zu einer Reduktion der Abdrift und der Anwenderexposition, nicht aber zu einer Reduktion der PSM-Einsatzmengen.		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Acker - Weizen	Abhängig vom Witterungsverlauf sind 25 % Reduktion möglich	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %
Acker - Zuckerrüben	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion bis >80 %; Risikoreduktion durch Hacken >50 %
Acker - Mais	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	Gesamtreduktion bis >65 %; Risikoreduktion durch Hacken >80 %
Acker - Raps	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %
Gemüse	Gesamtreduktion von >50 % mit Spot-Applikationen möglich; Risikoreduktion <5 %	Gesamtreduktion von >50 % mit Spot-Applikationen möglich; Risikoreduktion >70 %	Je nach Kultur kann Gesamtreduktion bis >80 % erreicht werden; Risikoreduktion ebenfalls bis >80 %
Obst	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	Gesamtreduktion von 50 % bei Punktspritzung gut möglich
Reben	Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %	In Reben häufig keine Insektizidbehandlungen	in Reben häufig keine Herbizidbehandlungen

<table>
<tr><td>M1 Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen
 </td><td colspan="3">Wirkungsziel:
Reduktion der Anzahl an Fungizid- und Insektizidanwendungen durch optimierte Pflanzenschutzplanung im Acker-, Gemüse-, Obst-, Rebbau
➔ 15 % weniger Fungizid- und Insektizidbehandlungen im Vergleich zu herkömmlich behandelten Flächen

Fazit
➔ Im Ackerbau ist im Vergleich zur heute üblichen Bewirtschaftung bei Fungiziden jahres- und kulturabhängig eine Reduktion um 5–25 % realisierbar.
➔ Im Gemüsebau funktionieren die verfügbaren Technologien noch nicht so, als dass eine zuverlässige Einsparung realisierbar wäre.
➔ Im Obstbau und Rebbau stehen zuverlässige Technologien zur Verfügung und werden genutzt, daher sind keine weiteren Einsparungen realisierbar.</td></tr>
<tr><td>Anbaurichtung - Kultur</td><td>Fungizideinsatz</td><td>Insektizideinsatz</td><td>Herbizideinsatz</td></tr>
<tr><td>Acker - Weizen</td><td>häufig nur 1 statt 2 Behandlungen durch Modellnutzung, über alle Parzellen und Jahre 5–25 % Reduktion erreicht</td><td>jahresabhängig ist eine Behandlung gegen Getreidehähnchen nötig, keine Möglichkeit zur Einsparung</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Acker - Zuckerrüben</td><td>Modell zu ungenau, durch Feldkontrollen und Wetterprognosen aber häufig nur 1 statt 2 Behandlungen bei robusten Sorten, über alle Parzellen und Jahre 0–45 % Reduktion erreicht</td><td>Prognosemodelle und digitale Kamerafallen nicht verfügbar</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Acker - Raps</td><td>Prognosemodelle nicht verfügbar</td><td>Kamerafallen erleichtern die Bestimmung der Flugkurven und damit die Terminierung der Behandlung, dadurch aber keine PSM-Einsparung</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Gemüse</td><td>vorhandene Krankheitsmodelle bilden nur den Ist-Zustand ab, bringen keinen Mehrwert</td><td>getestete Kamerafallen noch nicht praxisreif</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Obst</td><td colspan="2">Prognosemodelle bereits gut etabliert, zusätzlich wöchentliches Pflanzenschutzbulletin, weitere PSM-Einsparungen daher kaum möglich</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Reben</td><td>Prognosemodelle bereits gut etabliert, zusätzlich wöchentliches Pflanzenschutzbulletin, weitere PSM-Einsparungen daher kaum möglich</td><td>In Reben häufig keine Insektizidbehandlungen</td><td>-</td></tr>
</table>

M2 Satellitenbasierte Lenksysteme 	**Wirkungsziel** Reduktion der PSM-Ausbringmenge durch Reduktion der Fahrgassenüberlappung im **Acker**- und **Gemüsebau** ➔ **-3 % PSM-Ausbringmenge im Vergleich zu Flächen ohne Minimierung der Fahrgassenüberlappung** **Fazit** ➔ Ca. 1,5 % Reduktion realisierbar. ➔ Mit Lenksystemen angelegte gerade Reihen vereinfachen aber andere Massnahmen zur Pflanzenschutzmitteleinsparung wie das Hacken und den Einsatz von Unterblatt-Spritzvorrichtungen.		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Acker - Weizen	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion
Acker - Zuckerrüben	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion, erleichtertes Hacken
Acker - Mais	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	ca. 1,5 % Reduktion, erleichtertes Hacken
Acker - Raps	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion
Gemüse	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion, erleichtertes Hacken
M3 GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit automatischer Teilbreitenschaltung 	**Wirkungsziel** Reduktion der PSM-Ausbringmenge durch Minimierung der Spritzüberlappungen in Randzonen nicht rechteckiger Felder im **Acker**- und **Gemüsebau** ➔ **-2 % im Vergleich zu Flächen ohne Minimierung der Spritzüberlappungen** **Fazit** ➔ Meist ≤5 % Reduktion realisierbar, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Acker - Weizen	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
Acker - Zuckerrüben	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
Acker - Mais	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
Acker -Raps	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
Gemüse	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung

M4 Bewuchsspezifische Applikation von PSM mit Sensortechnik	**Wirkungsziel** Reduktion der PSM-Ausbringmenge durch Umstellung von ganzflächiger Applikation auf eine bewuchsspezifische Behandlung im **Acker**-, **Gemüse**- und **Obstbau**. ➔ **-50 % PSM-Ausbringmenge im Vergleich zu Flächen mit ganzflächiger Applikation** **Fazit** ➔ Generell lässt sich mit Spot-Spraying eine hohe bis sehr hohe Reduktion erzielen. ➔ Im Obstbau ist das Einsparpotenzial bei Fungiziden und Insektiziden vor allem aufgrund noch unzureichend funktionierender Technologien niedrig.		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Acker - Zuckerrüben	Spot-Spraying gewährt keinen ausreichenden Schutz	Spot-Spraying gewährt keinen ausreichenden Schutz	>80 % Reduktion durch Spot-Spraying möglich, Flächenbehandlung(en) zum «Säubern» nötig
Acker - Mais	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	Spot-Spraying nur bei Problemunkräutern, kaum Reduktionspotential
Gemüse	ca. 50 % Reduktion durch Kombination von Flächen- und Spot-Behandlungen in Salat; Risikoreduktion <5 %	ca. 50 % Reduktion durch Kombination von Flächen- und Spot-Behandlungen in Salat; Risikoreduktion >70 %	>80 % Reduktion durch Spot-Spraying möglich, Flächenbehandlung(en) zum «Säubern» nötig; Risikoreduktion ca. 20 %
Obst	meist <5 % Reduktion durch eine Präzisionsspritze mit automatischer Anpassung der Ausbringmenge an das Laubwandvolumen in gedeckten Anlagen (bis 38 % bei ungedeckten Anlagen – untypisch für Projektregion)	meist <5 % Reduktion durch eine Präzisionsspritze mit automatischer Anpassung der Ausbringmenge an das Laubwandvolumen in gedeckten Anlagen (bis 38 % bei ungedeckten Anlagen – untypisch für Projektregion)	gut 50 % Reduktion durch Punktspritzung nur im Stammbereich bei Baumabständen bis 120 cm
Rebbau	Die Dosierung nach Laubwandvolumen hat ein Fungizid-Reduktionspotenzial bis zu 50 %. Die mögliche Risikoreduktion liegt bei >30 %. Eine ganzflächige Umsetzung ist mit herkömmlicher Applikations-technik aufgrund der sehr divers strukturierten Rebbau-Parzellen in der Praxis aber oft nicht realisierbar. Im Projekt stand keine Technologie zur automatischen Anpassung der PSM-Ausbringmenge an das Laubwandvolumen zur Verfügung.	In Reben häufig keine Insektizidbehandlungen	in Reben häufig keine Herbizidbehandlungen

M5 Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung in Reihenkulturen 	**Wirkungsziel** Reduktion der Anzahl an Herbizid-Anwendungen in Reihenkulturen im **Acker-** und **Gemüsebau** ➔ **-70 % im Vergleich zu herkömmlichen, ganzflächig mit PSM behandelten Flächen** **Fazit** ➔ Im **Ackerbau** bis zu 100 % Herbizideinsparung und >80 % Risikoreduktion ➔ Im **Gemüsebau** vor allem im Salat bis zu 100 % Einsparung und >80 % Risikoreduktion		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Acker - Zuckerrüben	-	-	bis zu 67 % Reduktion durch Hacken und Bandbehandlungen; Risikoreduktion >50 %
Acker - Mais	-	-	bis zu 67 % Reduktion durch Hacken und Bandbehandlungen, teilweise kompletter Verzicht; Risikoreduktion >80 %
Gemüse	-	-	Hacken meist zusätzlich ergänzend zu Herbiziden, bei Salat aber auch öfter kompletter Verzicht auf Herbizide; Risikoreduktion bis >80 %
M6 Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung 	**Wirkungsziel** Reduktion der Anzahl an Herbizid-Anwendungen im Unterstockbereich von **Reben** und **Obst** ➔ **-70 % im Vergleich zu herkömmlichen PSM-Verfahren** **Fazit** ➔ Im **Obstbau** liegt das Reduktionspotential durch die Massnahme bei 75–100 %, das Gerät war im Praxistest jedoch noch sehr fehleranfällig. ➔ Im **Rebbau** stand kein Gerät zur Verfügung und es sind keine Aussagen möglich.		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Obst	-	-	Reduktionspotential durch die Massnahme ist hoch, versuchsweise eingesetztes Gerät war im Praxistest jedoch noch sehr fehleranfällig
Reben	-	-	Im Projekt stand kein Gerät zur Verfügung

M7 Drohneneinsatz zur Abdriftreduktion und Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster 	**Wirkungsziel** Reduktion der PSM-Ausbringmengen im Steillagen-**Rebbau** und Hochstamm-**Obstbau** ➔ **-30 % PSM-Ausbringmenge im Vergleich zu herkömmlicher Applikation** **Fazit** ➔ Im Steillagen-**Rebbau** und Hochstamm-**Obstbau** sind Applikationen zum optimierten Zeitpunkt und mit weniger Abdrift möglich. ➔ Die Zahl der Behandlungen und die Ausbringmengen reduzieren sich aber nicht. PSM-Einsparungen gegenüber Bodenspritzgeräten oder Helikoptern (bei Reben) sind dementsprechend nicht zu erwarten		
Anbaurichtung - Kultur	**Fungizideinsatz**	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Obst	Applikationen sind zum optimierten Zeitpunkt und mit weniger Abdrift möglich, die Zahl der Behandlungen und die Ausbringmengen reduzieren sich aber nicht, PSM-Einsparungen gegenüber Bodenspritzgeräten sind dementsprechend nicht zu erwarten		-
Reben	Applikationen sind zum optimierten Zeitpunkt und mit weniger Abdrift möglich, die Zahl der Behandlungen und die Ausbringmengen reduzieren sich aber nicht, PSM-Einsparungen gegenüber Bodenspritzgeräten und Helikoptern sind dementsprechend nicht zu erwarten		-

2.5.2 Resultate ökologisches Wirkungsmonitoring nach Anbaurichtungen

In Tabelle 4 sind die erzielten Einsparungen und die Risikoreduktion nach Anbaurichtungen bzw. Kulturen, PSM-Anwendungsgebiet und Massnahmen aufgeführt. Da die Wirkungsziele nur pro Massnahmen definiert wurden und nicht pro Anbaurichtung und PSM-Anwendungsgebiet, gibt es hier keinen farbcodierten Zielerreichungsgrad. Die Reduktionswerte in dieser Tabelle wurden zur Erstellung von Tabelle 3 mit den erzielten Einsparungen nach Massnahmen verwendet.

Tabelle 4: Durch umgesetzte Massnahmen erzielte Einsparungen an PSM in verschiedenen Kulturen und Einschätzung des Potentials im Hinblick auf das Gesamtziel von mindestens 25 % Reduktion.

		Fungizideinsatz	**Insektizideinsatz**	**Herbizideinsatz**
Weizen	M1	häufig nur 1 statt 2 Behandlungen durch Modellnutzung, über alle Parzellen und Jahre 5–25 % Reduktion erreicht	jahresabhängig ist eine Behandlung gegen Getreidehähnchen nötig, keine Möglichkeit zur Einsparung	-
	M2	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion
	M3	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
	Fazit	**jahresabhängig sind 25 % Reduktion möglich**	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**
Zuckerrüben	M1	Modell zu ungenau, durch Feldkontrollen und Wetterprognosen aber häufig nur 1 statt 2 Behandlungen bei robusten Sorten, über alle Parzellen und Jahre 0–45 % Reduktion erreicht	Prognosemodelle und digitale Kamerafallen nicht verfügbar	-
	M2	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion, erleichtertes Hacken

		Fungizideinsatz	Insektizideinsatz	Herbizideinsatz
	M3	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
	M4	Spot-Spraying gewährt keinen ausreichenden Schutz	Spot-Spraying gewährt keinen ausreichenden Schutz	>80 % Reduktion durch Spot-Spraying möglich, Flächenbehandlung(en) zum «Säubern» nötig
	M5	-	-	bis zu 67 % Reduktion durch Hacken und Band-behandlungen; Risikoreduktion >50 %
	Fazit	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion von mindestens 25 % kann deutlich übertroffen werden**
Mais	M2	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	ca. 1,5 % Reduktion, erleichtertes Hacken
	M3	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
	M4	kein Mittel zugelassen	nur Trichogramma zugelassen	Spot-Spraying nur bei Problemunkräutern, kaum Reduktionspotential
	M5	-	-	bis zu 67 % Reduktion durch Hacken und Band-behandlungen, teilweise kompletter Verzicht; Risikoreduktion >80 %
	Fazit	**-**	**-**	**Gesamtreduktion von mindestens 25 % kann deutlich übertroffen werden**
Raps	M1	Prognosemodelle nicht verfügbar	Kamerafallen erleichtern die Bestimmung der Flugkurven und damit die Terminierung der Behandlung, dadurch aber keine PSM-Einsparung	-
	M2	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion
	M3	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
	Fazit	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**
Gemüse	M1	vorhandene Krankheitsmodelle bilden nur den Ist-Zustand ab, bringen keinen Mehrwert; getestete Kamerafallen noch nicht praxisreif		-
	M2	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion	ca. 1,5 % Reduktion, erleichtertes Hacken
	M3	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung	meist <5 % Reduktion, ca. 5 % zusätzliche Reduktion bei Einzeldüsenschaltung
	M4	ca. 50 % Reduktion durch Kombination von Flächen- und Spot-Behandlungen in Salat; Risikoreduktion <5 %	ca. 50 % Reduktion durch Kombination von Flächen- und Spot-Behandlungen in Salat; Risikoreduktion >70 %	>80 % Reduktion durch Spot-Spraying möglich, Flächenbe-handlung(en) zum «Säubern» nötig; Risikoreduktion ca. 20 %

		Fungizideinsatz	Insektizideinsatz	Herbizideinsatz
	M5	-	-	Hacken meist zusätzlich, bei Salat aber auch öfter kompletter Verzicht auf Herbizide; Risikoreduktion bis >80 %
	Fazit	**Gesamtreduktion von mindestens 25 % nur bei Spot-Applikationen möglich**	**Gesamtreduktion von mindestens 25 % nur bei Spot-Applikationen möglich**	**Gesamtreduktion von mindestens 25 % kann je nach Kultur erreicht werden**
Obst	M1	Prognosemodelle bereits gut etabliert, zusätzlich wöchentliches Pflanzenschutzbulletin, weitere PSM-Einsparungen daher kaum möglich		-
	M4	meist <5 % Reduktion durch eine Präzisionsspritze mit automatischer Anpassung der Ausbringmenge an das Laubwandvolumen in gedeckten Anlagen (bis 38 % bei ungedeckten Anlagen – untypisch für Projektregion)		gut 50 % Reduktion durch Punktspritzung nur im Stammbereich bei Baumabständen bis 120 cm
	M6	-	-	Reduktionspotential durch die Massnahme ist hoch, Gerät im Praxistest jedoch noch sehr fehleranfällig
	M7	Applikationen sind zum optimierten Zeitpunkt und mit weniger Abdrift möglich, die Zahl der Behandlungen und die Ausbringmengen reduzieren sich aber nicht, PSM-Einsparungen gegenüber Bodenspritzgeräten sind dementsprechend nicht zu erwarten		-
	Fazit	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**Gesamtreduktion von mindestens 25 % bei Punktspritzung gut möglich**
Reben	M1	Prognosemodelle bereits gut etabliert, zusätzlich wöchentliches Pflanzenschutzbulletin, viele Betriebe verzichten bereits auf Insektizide		-
	M4	Fungizid-Reduktion durch Dosierung nach Laubwandvolumen bis zu 50 %, Risikoreduktion >30 %; Umsetzung auf allen Parzellen mit herkömmlicher Technik nicht realisierbar, Technologie zur automatischen Anpassung der Ausbringmenge an das Laubwandvolumen nicht verfügbar; viele Betriebe verzichten bereits auf Insektizide		in Reben häufig keine Herbizidbehandlungen
	M7	Applikationen sind zum optimierten Zeitpunkt und mit weniger Abdrift möglich, die Zahl der Behandlungen und die Ausbringmengen reduzieren sich aber nicht, PSM-Einsparungen gegenüber Bodenspritzgeräten und Helikoptern sind dementsprechend nicht zu erwarten		-
	Fazit	**Gesamtreduktion durch Massnahmen <25 %**	**in Reben häufig keine Insektizidbehandlungen**	**in Reben häufig keine Herbizidbehandlungen**

2.5.3 Resultate ökologisches Wirkungsmonitoring: Zusammenfassung

Ackerbau

- Der Einsatz von GPS-Lenksystemen und Spritzen mit automatischer Teilbreitenschaltung ermöglicht in allen Kulturen Einsparungen an Fungiziden, Insektiziden und Herbiziden im einstelligen Prozentbereich. Durch erleichtertes Hacken infolge gerade angelegter Pflanzenreihen und die Vermeidung von unerwünschten Austrägen durch präzises Schalten am Feldrand bieten beide Technologien auch weitergehende Möglichkeiten, um negative Umweltwirkungen beim PSM-Einsatz einzudämmen.
- Im intensiven Weizenanbau ist die Reduktion des Fungizideinsatzes um 25 % durch einen späteren Spritzstart je nach Jahreswitterung möglich. Zur Entscheidungsunterstützung steht ein Prognosemodell zur Verfügung, das jedoch kein Selbstläufer ist, sondern eine intensive Betreuung durch die landwirtschaftliche Beratung erfordert.

Die Auseinandersetzung mit dem Modell hat eine Sensibilisierung bei den Produzenten ausgelöst und dazu geführt, dass sie ihre bisherige Fungizidstrategie überdenken. Insektizide kommen beim Weizen eher selten zum Einsatz, jahresabhängig ist eine Behandlung gegen Getreidehähnchen jedoch nicht vermeidbar. Das Potential zur Herbizidreduktion im Weizen durch die im Projekt betrachteten Technologien ist gering.

- Im Zuckerrübenanbau ist eine Reduktion des Fungizideinsatzes um 25 % je nach Jahreswitterung ebenfalls möglich, sofern Erstbefall und Infektionsbedingungen bei der Behandlungsterminierung beachtet werden. Zur Entscheidungsunterstützung gibt es allerdings noch keine geeignete Technologie. Das getestete Modell erwies sich als zu ungenau für Schweizer Verhältnisse und konnte Feldkontrollen nicht ersetzen. Die Möglichkeiten zur Einschränkung des Insektizideinsatzes in Zuckerrüben sind beschränkt. Kamerafallen können zwar helfen, die Behandlungen optimal zu setzen, die Zahl der Applikationen wird dadurch jedoch nicht reduziert, weil gegen die verschiedenen Schadinsekten in der Regel jeweils nur einmal behandelt wird. Im Hinblick auf den Herbizideinsatz kann das Gesamtziel von 25 % Reduktion allein durch die Kombination von Hacken und Bandbehandlungen bereits deutlich übertroffen werden. Die Spot-Behandlung von Unkräutern ermöglicht ebenfalls erhebliche Einsparungen.
- Pflanzenschutz im Mais beinhaltet fast ausschliesslich Herbizidbehandlungen. Wie bei Zuckerrüben kann das Gesamtziel von 25 % Reduktion durch die Kombination von Hacken und Bandbehandlungen deutlich übertroffen werden. Spot-Spraying wird nur zur Bekämpfung einzelner Problemunkräuter wie Disteln und Blacken eingesetzt und bietet im Mais dementsprechend wenig Potential.
- Im Rapsanbau findet eine Vielzahl an Insektizideinsätzen statt. Mithilfe von digitalen Kamerafallen können die Einsätze optimal terminiert werden, eine Reduktion der Insektizideinsätze ist damit jedoch nicht möglich.

Gemüsebau

Derzeit gibt es im Gemüsebau keine funktionierenden Prognosemodelle, durch deren Nutzung die Behandlung von Krankheiten optimiert werden könnte. Die am Markt verfügbaren Kamerafallen bringen im Hinblick auf die Bekämpfung von Schadinsekten im Moment ebenfalls keinen Mehrwert. Ein grosses Potential zur Einsparung von Fungiziden und Insektiziden bietet jedoch die Ausbringung der Mittel als Spot-Spraying direkt auf die Kultur. Im Projekt wurden Spot-Behandlungen nur in Salat umgesetzt. Die Ausweitung auf andere Gemüsearten ist aber denkbar und wurde durch Agroscope bereits an Chinakohl und Knollensellerie erfolgreich getestet. Hersteller von Spot-Spraying Technologie wie die Firma Ecorobotix entwickeln fortlaufend neue Erkennungsalgorithmen zum Einsatz ihrer Geräte in immer mehr Kulturen. Hier ist dann eine Gesamtreduktion des Fungizid- und Insektizideinsatzes von mindestens 25 % durchaus realistisch. Spot-Behandlungen gegen Unkräuter werden bereits für diverse Gemüsearten angeboten und ermöglichen pro Applikation eine Herbizidreduktion von >80 % gegenüber einer Flächenbehandlung. Zur anfänglichen Minderung des Unkrautdrucks ist diese aber meist auch noch erforderlich. Hacken als Alternative zum Herbizideinsatz gewinnt durch den Wegfall zahlreicher Mittel im Gemüsebau wieder mehr an Bedeutung. Häufig erfolgt das Hacken aber zusätzlich zu den bewilligten Spritzungen, da diese vielfach nicht ausreichen, um das Unkraut zu kontrollieren.

Obstbau

Einsparungen an Fungiziden und Insektiziden von mindestens 25 % sind durch die eingesetzten Technologiemassnahmen nicht zu erreichen. Prognosemodelle für die wichtigsten Krankheiten werden bereits aktiv von den Produzenten genutzt und durch das wöchentliche Monitoring der Obstbau-Fachstellen erhalten die Betriebe seit langem einen guten Überblick über das Auftreten von Schadinsekten. Detaillierte Behandlungsempfehlungen waren somit im Obstbau bereits vor Projektbeginn etabliert. Sprühgeräte mit technischer Ausstattung nach Vorgabe des BLW für die Ressourceneffizienzbeiträge verfügen lediglich über eine einfache Detektion, durch die am Reihenende alle Düsen und bei grösseren Bestandslücken (die in der Praxis aber kaum vorkommen) die entsprechende Seite komplett abgeschaltet wird. Die Einsparung an PSM ist dementsprechend gering. Ein grösseres Reduktionspotential versprach das im Projekt angeschaffte Inovel-Gerät mit automatischer sensorgesteuerter Anpassung der Applikationsmenge an das tatsächliche Laubwandvolumen. Die erzielte Einsparung lag im Durchschnitt jedoch bei <5 %, da das Gerät lange Pflanzstäbe und die Pfähle der in der Projektregion verbreiteten Hagelschutznetze nicht von den Bäumen unterschieden und jeweils bis oben behandelt hat. In Mostobstanlagen ohne Witterungsschutz betrug die Einsparung bis zu 38 %. Sprühdrohnen wurden im Rahmen von PFLOPF nicht in

Obstanlagen eingesetzt. Eine Reduktion des Fungizid- und Insektizideinsatzes wäre jedoch auch mit Drohnen nicht möglich, da sich die Zahl der Behandlungen und die Ausbringmengen im Vergleich zur Bodenapplikation nicht verringern. Im Hinblick auf Herbizidapplikationen bietet der auf den Stammbereich beschränkte Einsatz einer Punktspritze die Möglichkeit, Einsparungen von gut 50 % zu erzielen. Um ein schnelleres Zuwachsen der Fläche und damit eine Zunahme der Behandlungen im Vergleich zur Bandapplikation zu verhindern, sollte der Bewuchs in den unbehandelten Bereichen zwischen den Bäumen kurzgehalten werden. Ein völliger Herbizidverzicht ist durch das Mulchen des Unterwuchses möglich, was jedoch beim Einsatz herkömmlicher Technik sehr arbeitsintensiv ist. Ein autonom arbeitender Mulchroboter wäre eine attraktive Lösung, das im Projekt getestete Gerät brachte jedoch noch nicht zuverlässig die versprochene Leistung.

Rebbau

Der Pflanzenschutz ist im Rebbau vergleichsweise einfach und viele Betriebe verzichten deshalb bereits auf den Einsatz von Insektiziden und Herbiziden. Zur Behandlung der wichtigsten Pilzkrankheiten gibt es verlässliche Prognosemodelle, die bereits vor Projektbeginn von den Produzenten aktiv genutzt wurden. Durch die im ÖLN geforderte Dosierung nach Laubwandvolumen lässt sich der Fungizideinsatz theoretisch um bis zu 50 % reduzieren, sofern alle Parzellen nach dem Agrometeo-Rechenmodell "Angepasste Dosierung" behandelt werden (https://www.agrometeo.ch/de/weinbau/angepasste-dosierung). Nach Gesprächen mit Betriebsleitern sei in der Praxis eine Anpassung auf Parzellenebene mit herkömmlicher Technik jedoch nicht realisierbar. Es bräuchte eine praxistaugliche Technologie zur automatischen Anpassung der Ausbringmenge an das Laubwandvolumen. Momentan ist diese, wie im Obstbau, noch nicht verfügbar. Fungizidbehandlungen mittels Sprühdrohnen nehmen im Rebbau zu, ermöglichen jedoch, wie bereits beim Obstbau dargelegt, keine PSM-Einsparungen. Für die Betriebsleiter liegt ein Hauptansatzpunkt zur Senkung des PSM-Einsatzes in der Umsetzung der präventiven Massnahmen innerhalb der Pflanzenschutzpyramide. Denn das grösste Potenzial bietet derzeit der Anbau von robusten Rebsorten mit einer möglichen Reduktion von 50–70 %.

2.5.4 Resultate ökonomische Untersuchungen nach Massnahmen

Massnahme 1 – Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis der angewandten Prognosemodelle, Monitoringsysteme und der Wetterstationen wird durch die Betriebsleitenden über die Anbaurichtungen mehrheitlich (tendenziell) positiv eingeschätzt (siehe Kapitel 6.5). Ausnahmen bilden die in Deutschland entwickelten und in der Schweiz bislang wenig etablierten Prognosesysteme Septri und Cercbet (Ackerbau) und ein Krankheitsmodell im Gemüsebau mit leicht negativer bzw. neutraler Wahrnehmung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Zwischen den Anbaurichtungen und Kulturen bestehen dabei Unterschiede, da Prognosesysteme unterschiedlich stark etabliert sind und angewandt werden.

Die Betriebsleitenden aller Anbaurichtungen erwarten mehrheitlich, dass Prognosesysteme künftig an Bedeutung zunehmen werden. Dies ist Ausdruck des wahrgenommenen Nutzens und kann auch als Bedarf für einen Ausbau der Tools interpretiert werden.

Dieses Massnahmenpaket weist ein gewisses Potential zur PSM-Reduktion auf, hilft den Betrieben allerdings vor allem bei der richtigen Terminierung des PSM-Einsatzes. Ob tatsächlich eine Reduktion möglich ist, hängt insbesondere von Witterungs- und Standorteinflüssen ab. Tools und Instrumente können sowohl durch private Unternehmen wie auch die öffentliche Forschung und Beratung zur Verfügung gestellt werden. Vor Ort können die Betriebe Sensoren zur Datenerfassung installieren und betreiben. Die verstärkte Nutzung neuer Monitoring- und Prognoseinstrumente kann durch die Information und Wissensvermittlung seitens der landwirtschaftlichen Bildung und Beratung gefördert werden.

Massnahme 2 – Satellitenbasierte (GPS-) Lenksysteme zur Minimierung der Fahrgassenüberlappung

Der Einsatz eines Lenksystems lohnt sich ab einer Ackerfläche von rund 30 ha. Die Einsparungen an Betriebsmitteln inkl. PSM (1,5 %) und Arbeitserledigungskosten (Arbeitskostenansatz plus Maschinenkosten, 5 %) übersteigen dann die Mehrkosten eines Lenksystems. Wenn die Landwirte einen neuen Traktor kaufen, wird dieser nahezu von allen Befragten mit einem Lenksystem gekauft. Die Mehrheit der Landwirte empfiehlt Berufskollegen auch die Anschaffung eines Lenksystems. Es ist davon auszugehen, dass sich der Einsatz dieser Technologie und die mit ihrer Verwendung einhergehenden Einsparungen an Betriebsmitteln auf spezialisierten Ackerbaubetrieben weiterverbreiten wird.

Massnahme 3 – GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltung

Der Einsatz einer Teilbreitenschaltung (TBS) lohnt sich für einen durchschnittlich grossen Ackerbaubetrieb nahezu. Bei Einsparungen an PSM von 4 % können die Mehrkosten (rund 10 000 Franken) der Anschaffung einer Teilbreitenschaltung zwar nicht ganz, aber nahezu ausgeglichen werden.

Grund für den Kauf einer TBS ist primär die Arbeitsentlastung. Mehrheitlich (79 %) wird Kollegen die Anschaffung einer TBS empfohlen. Neben der Anschaffung einer neuen Feldspritze mit dieser Technologie besteht auch die Möglichkeit, eine Spritze damit nachzurüsten.

Eine Spritze mit Einzeldüsenschaltung ist mit höheren Anschaffungskosten (etwa doppelt so hoch wie eine Spritze mit TBS) verbunden. Daher ist diese Technologie lediglich für grosse und pflanzenschutzintensive Betriebe interessant.

Massnahme 4 – Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik

Im **Gemüsebau** ist der Einsatz einer Präzisionsspritze zur Spot-Behandlung von Unkräutern in Zwiebeln ab einer Auslastung dieser Spritze von 85 ha Einsatzfläche wirtschaftlich. Die Mehrkosten der Arbeitserledigung entsprechen dann nahezu den Einsparungen an PSM-Kosten bei einer leicht geringeren Flächenleistung. Bislang ersetzt die Präzisionsspritze die übliche Feldspritze noch nicht, sondern muss ergänzend eingesetzt werden, so dass die zusätzliche Anschaffung einer Präzisionsspritze durch einen Betrieb in höheren Maschinen-Fixkosten resultiert.

Bei einer intensiven Nutzung ist auch eine auf einer Hacke montierte Präzisionsspritze zur Ausbringung von Fungiziden und Insektiziden auf Eisbergsalat wirtschaftlich. Zu beachten ist, dass dieses Verfahren durch eine deutlich geringere Flächenleistung einen erhöhten Arbeitszeitbedarf und eine geringere Schlagkraft bzw. Flexibilität zur Folge hat.

Beide Verfahren werden zwar als nützlich erachtet, die Maschinenkosten und die Einarbeitung werden jedoch kritisch beurteilt und nur einer von drei antwortenden Gemüsebauern empfiehlt Kollegen die Anschaffung dieser Technologie. Die Förderung der Anschaffung von Feldrobotern im Rahmen der Strukturverbesserung bis Ende 2030 durch den Bund und gewisse Kantone begünstigt gegenwärtig deren Verbreitung Unter den aktuellen Rahmenbedingungen, den vorliegenden Ergebnissen sowie der politischen Zielsetzung, den Einsatz und die Risiken von PSM zu reduzieren, wird die Beibehaltung der Förderung vorgeschlagen; die detaillierten Förderbedingungen sollten Mitnahmeeffekten vorbeugen.

Im **Obstbau** erfordert die laubwandspezifische Ausbringung von PSM in Apfelplantagen die Investition in eine Präzisionsspritze. Die Zusatzinvestition amortisiert sich in Tafelobst nicht, da herkömmliche Anlagen mit Hagelschutznetzen ausgestattet sind, deren viele Pfähle immer mitbehandelt werden. Das Potenzial zur Einsparung von PSM ist dementsprechend gering. Der Einsatz der Technologie in einer Mostobstanlage ohne Hagelschutz konnte den PSM-Einsatz um etwa 30 % reduzieren.

Die Reduktion von Herbiziden durch den Einsatz einer Punktspritze ausschliesslich im Stammbereich der Obstbäume verlangt die Anschaffung zusätzlicher Geräte (Fadenmäher) und verursacht höhere Arbeitskosten. Die Massnahme ist gegenwärtig nicht wirtschaftlich umsetzbar.

Massnahme 5 – Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung im Acker- und Gemüsebau

Die einfacheren Verfahren mit GPS-gesteuertem bzw. kameragesteuertem Hacken zwischen den Reihen kombiniert mit einer Bandspritzung sind zwar leicht teurer als eine Flächenbehandlung mit Herbizid. Die Förderung durch Direktzahlungen im Programm «Verzicht auf Herbizide» deckt aber die höheren Kosten und einen evtl. erforderlichen zusätzlichen Hackdurchgang. Das kameragesteuerte Hacken auch innerhalb der Reihen ist infolge der geringen Flächenleistung und hoher Investitionskosten aktuell nicht wirtschaftlich umsetzbar im Ackerbau.

Die Befragung der Landwirte ergab, dass die ausschliessliche sensorgesteuerte Beikrautregulierung gegenwärtig als herausfordernd erachtet wird. Die Anschaffungsempfehlung ist tendenziell eher positiv.

Massnahme 6 – Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau

Im Projekt wurde das robotergesteuerte Mulchen mit einem Prototyp getestet, der jedoch aufgrund häufiger technischer Probleme, geringer Flächenleistung und aufwändiger Energieversorgung kaum praxistauglich war. Daher wurde auf eine Wirtschaftlichkeitsanalyse verzichtet. Langfristig könnte die Technologie bei weiterer

Entwicklung eine arbeitszeitsparende Option für Obstbaubetriebe darstellen, insbesondere in der Schweiz mit ihren hohen Lohnkosten.

Massnahme 7 – Drohneneinsatz zur Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster und Abdriftreduktion im Reb- und Obstbau

Da eine Drohne herkömmliche Spritzverfahren bislang noch nicht substituieren kann, resultiert deren Anschaffung in höheren Maschinenfixkosten. Werden zwei Verfahren parallel durch eigene Geräte umgesetzt, ergeben sich ausserdem eine geringere Auslastung der Maschinen und entsprechend höhere Kosten je Ausbringung. In gut befahrbaren Lagen ist der Einsatz von Drohnen gegenwärtig nicht wirtschaftlich.

Der Einsatz einer Drohne kann in schwierigem Gelände (Steillagen oder Terrassen) wirtschaftlich sein. Auch in befahrbaren Lagen kann eine Drohne die termingerechte Ausbringung von PSM sicherstellen, wenn die Ausbringung mit anderen Verfahren auf Grund der Bodenfeuchte noch nicht möglich ist. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Drohnen hängt damit stark von den betrieblichen Gegebenheiten ab (Rebfläche bzw. Auslastung, Anteil von Lagen mit schwieriger Befahrbarkeit).

Die weitere Entwicklung dieser Technologie und ihres Anschaffungspreises wie auch die Entwicklung des gesetzlichen Rahmens ihres Einsatzes werden den künftigen Einsatz von Drohnen bestimmen.

2.5.5 Resultate ökonomische Untersuchungen: Zusammenfassung

Der Einsatz von Precision Farming Technologien ist mit Investitionen verbunden. Diese Investitionen erfolgen teils mit dem Ersatz bestehender Maschinen, z. B. beim Kauf eines neuen Traktors oder einer Spritze. Teilweise werden neue Maschinen zusätzlich erworben. Die Investitionskosten können sich je nach Massnahmen stark unterscheiden. Der Einsatz von Precision Farming Technologien kann zu veränderten Anbauverfahren führen und damit sowohl die Direkt- als auch die Arbeitserledigungskosten (Arbeits- und Maschinenkosten) verändern.

Lenksysteme und die automatische Teilbreitenschaltung ermöglichen im Ackerbau eine Einsparung an Direktkosten (PSM, Saatgut und Düngemittel) im einstelligen Prozentbereich und der Traktor- und Arbeitskosten. Für durchschnittlich grosse Ackerbaubetriebe lohnt sich die Investition in diese Technologien, bei der Teilbreitenschaltung unter Berücksichtigung qualitativer Aspekte der Arbeitsentlastung. Mit einer höheren Auslastung auf sehr grossen Betrieben steigt die Attraktivität dieser Technologien noch an. Wenn diese Technologien bei einer geringeren Auslastung angeschafft werden, steht für die Landwirte primär die Arbeitserleichterung bzw. der erhöhte Arbeitskomfort im Vordergrund.

Spot-Spraying wurde für den Einsatz im Gemüsebau betrachtet. Der Einsatz dieser Technologie ermöglicht hohe Einsparungen an Pflanzenschutzmitteln, allerdings sind auch die Anschaffungskosten sehr viel höher als bei einer konventionellen Spritze. Selbst im überbetrieblichen Einsatz ist der Einsatz der Präzisionsspritzen kostenintensiver als die konventionelle Spritze.

Im Ackerbau ist das Hacken zwischen den Reihen kombiniert mit einer Bandspritzung wirtschaftlich, wenn Beiträge zum Herbizidverzicht bezogen werden können. Die Technologie zum Hacken in der Reihe ist gegenwärtig noch sehr teuer. Der Einsatz der Hacke ist an gewisse Bodenbedingungen geknüpft und mit Terminkosten verbunden. Ausserdem steigt mit dem Hacken der Arbeitszeitbedarf.

Der Einsatz von Drohnen im Weinbau bietet sich insbesondere in schwierig zu befahrenen Lagen an. In der Praxis ist der Einsatz der Drohne zudem nur begrenzt möglich. So muss zum Fliegen einer Drohne eine Prüfung abgelegt werden. Wird ein Lohnunternehmen beauftragt, geht Flexibilität verloren, da häufig viele Landwirte zur gleichen Zeit eine Drohne benötigen. Schliesslich kann die Drohne Blätter und Trauben nicht so gut benetzen wie eine Gebläsespritze. In steilen oder Terrassenlagen kann die Drohne wirtschaftlich interessant sein.

Die betrachteten Technologien ermöglichen teils grosse Einsparungen an PSM. Allerdings sind in der kleinstrukturierten Schweizer Landwirtschaft die Möglichkeiten zur Auslastung der teils sehr teuren Maschinen herausfordernd. Die im Vergleich mit dem Ausland höheren Lohnkosten in der Schweizer Landwirtschaft können den Einsatz arbeitssparender Precision Farming-Technologien begünstigen. Anstrengungen zum Verzicht auf PSM und finanzielle Anreize zum Einsatz dieser Technologien können den Einsatz weiter antreiben. Ausserdem ist zu erwarten, dass mit zunehmender technologischer Entwicklung und Verbreitung der Technologien die Kosten künftig abnehmen könnten.

2.6 Schlussfolgerungen

2.6.1 Schlussfolgerungen Ökologie

Ackerbau

Der Einsatz von GPS-Lenksystemen und Spritzen mit automatischer Teilbreitenschaltung ermöglicht in allen Ackerkulturen vergleichsweise geringe Einsparungen im einstelligen Prozentbereich. Beide Technologien bieten durch das erleichterte Hacken und die Vermeidung von unerwünschten Austrägen am Feldrand aber weitergehende Möglichkeiten zur Eindämmung negativer Umweltwirkungen beim PSM-Einsatz. Im intensiven Weizenanbau ist die Reduktion des Fungizideinsatzes um 25 % bei angepasstem Spritzstart gemäss Prognosemodell je nach Jahreswitterung möglich. Insektizide kommen beim Weizen eher selten zum Einsatz, jahresabhängig ist eine Behandlung gegen Getreidehähnchen jedoch nicht vermeidbar. Das Potential zur Herbizidreduktion im Weizen durch die im Projekt betrachteten Technologien ist gering. Im Zuckerrübenanbau ist eine Reduktion des Fungizideinsatzes um 25 % durch angepasste Behandlungstermine je nach Jahreswitterung ebenfalls möglich, eine zuverlässige Technologie zur Entscheidungsunterstützung steht allerdings in der Schweiz nicht zur Verfügung. Der Insektizideinsatz in Zuckerrüben lässt sich mit Hilfe von Kamerafallen optimal terminieren, Einsparungen an PSM sind dadurch jedoch nicht möglich, da in der Regel nur einmal gegen einen Schaderreger behandelt wird. Beim Herbizideinsatz in Zuckerrüben und Mais kann das Gesamtziel von 25 % Reduktion allein durch die Kombination von Hacken und Bandbehandlungen bereits deutlich übertroffen werden. Das Risiko für Organismen in Oberflächengewässern reduziert sich dadurch um 50 bis >80 %. Die Spot-Behandlung von Unkräutern ermöglicht bei Zuckerrüben ebenfalls erhebliche Einsparungen.

Gemüsebau

Derzeit gibt es im Gemüsebau keine funktionierenden Prognosemodelle. Die am Markt verfügbaren Kamerafallen bringen ebenfalls noch keinen Mehrwert, da die Kameras unscharfe Bilder liefern und die Erkennungsalgorithmen nicht funktionieren. Ein grosses Potential zur Einsparung von Fungiziden und Insektiziden bietet die Ausbringung der Mittel als Spot-Spraying direkt auf die Kultur. Hier ist eine Gesamtreduktion des Fungizid- und Insektizideinsatzes von >50 % bei vielen Gemüsekulturen möglich. Bei der Behandlung von Salat konnte das Risiko für Organismen in Oberflächengewässern dadurch um 5 % (Fungizide) bzw. >70 % (Insektizide) reduziert werden. Spot-Behandlungen gegen Unkräuter werden bereits für diverse Gemüsekulturen angeboten und ermöglichen pro Applikation eine Herbizidreduktion von >80 % gegenüber einer Flächenbehandlung. Die Spot-Behandlung von Unkraut in Zwiebeln reduzierte das Risiko für Organismen in Oberflächengewässern um ca. 20 %.

Obstbau

Prognosemodelle und Monitoring-Informationen für die wichtigsten Krankheiten und Schädlinge der Obstbau-Fachstellen werden seit langem aktiv von den Produzenten genutzt. Zusätzliche Einsparungen an Fungiziden und Insektiziden von mindestens 25 % sind durch die eingesetzten Technologiemassnahmen daher nicht zu erreichen. Sprühgeräte mit technischer Ausstattung nach Vorgabe des BLW für die Ressourceneffizienzbeiträge verfügen lediglich über eine einfache Detektion, die Einsparung an PSM ist gering. Ein grösseres Reduktionspotential bietet eine Gerätetechnologie mit automatischer sensorgesteuerter Anpassung der Applikationsmenge an das tatsächliche Laubwandvolumen. Die erzielte Einsparung lag im Durchschnitt jedoch bei <5 %, da das Gerät die vielen Pflanzstäbe und Hagelnetzpfähle in den Anlagen nicht differenzieren konnte und mitbehandelte. Sprühdrohnen wurden im Projekt nicht eingesetzt, da sich keine Reduktion des Fungizid- und Insektizideinsatzes ergeben würde. Im Hinblick auf Herbizidapplikationen bietet der auf den Stammbereich beschränkte Einsatz einer Punktspritze die Möglichkeit, Einsparungen von gut 50 % zu erzielen. Diese Behandlungsmethode muss mit einem häufigen Mulchen in und zwischen den Reihen ergänzt werden. Aus arbeitswirtschaftlicher Sicht bräuchte es dazu autonom arbeitende Maschinen, Mulchroboter brachten jedoch noch nicht die benötigte Leistung.

Rebbau

Viele Betriebe verzichten generell auf den Einsatz von Insektiziden und Herbiziden. Zur Behandlung der wichtigsten Pilzkrankheiten gibt es verlässliche Prognosemodelle, die bereits vor Projektbeginn von den Produzenten aktiv genutzt wurden. Zusätzliche Einsparungen an Fungiziden und Insektiziden von mindestens 25 % sind durch die eingesetzten Technologiemassnahmen daher nicht zu erreichen. Fungizidbehandlungen mittels Sprühdrohnen

nehmen im Rebbau zu, ermöglichen jedoch, wie bereits beim Obstbau dargelegt, keine PSM-Einsparungen. Für die Betriebsleiter liegt ein Hauptansatzpunkt zur Senkung des PSM-Einsatzes in der Umsetzung der präventiven Massnahmen innerhalb der Pflanzenschutzpyramide. Denn das grösste Potenzial bietet derzeit der Anbau von robusten Rebsorten mit einer möglichen Reduktion von 50–70 %.

2.6.2 Schlussfolgerungen Ökonomie

Die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz der untersuchten Massnahmen variieren stark zwischen den Betriebszweigen.

Wirtschaftlichkeit: Im Ackerbau werden vergleichsweise breit einsetzbare Technologien wie Lenksysteme und Teilbreitenschaltungen häufig genutzt, da sie auch auf mittelgrossen Betrieben wirtschaftlich tragfähig sind, während teurere Technologien wie Spot-Spraying kaum eingesetzt werden. Im Gemüsebau ist die Umsetzung weiter fortgeschritten. Hohe Arbeitskosten und die in vielen Kulturen hohe Wertschöpfung begünstigen in diesem Bereich den Einsatz neuer Technologien. Der Obstbau zeigt eine relativ geringe Umsetzung, da hohe Kosten und zusätzlicher Arbeitsaufwand den Nutzen der Technologien einschränken. Im Rebbau sind Drohnen in Steillagen vielversprechend, PSM-Einsparungen bleiben jedoch gering, der Hauptnutzen liegt im Anwenderschutz und der besseren Zugänglichkeit von Steillagen.

Akzeptanzfördernd wirken über alle Branchen hinweg finanzielle Beiträge wie über Direktzahlungen und die Strukturverbesserungsverordnung, Arbeitsentlastung und Steigerung des Anwenderschutzes.

Akzeptanzhemmend wirken hohe Investitionskosten, fehlendes Wissen für den Umgang mit der Technologie und fehlende Integration in bestehende Prozesse.

2.6.3 Weiterer Bedarf an wissenschaftlichen Arbeiten, verbleibende offene Fragen

Tabelle 5 zeigt die Technologien nach Technologiereife und Praxisanwendbarkeit, PSM-Einsparung und Wirtschaftlichkeit. Bis auf eine Ausnahme lassen sich alle Massnahmen mit hoher PSM-Einsparung noch nicht wirtschaftlich einsetzen. Die Technologien mit hoher Einsparung im Obst- und Rebbau sind noch nicht praxisreif und müssen weiterentwickelt werden. Die Prognose- und Monitoringsysteme umfassen eine Vielzahl an Anwendungen in unterschiedlichen Stadien der Technologiereife und Praxisanwendbarkeit mit unterschiedlichem Optimierungsbedarf. Generell sind Technologiereife und Praxisanwendbarkeit im Obst- und Rebbau wesentlich höher als im Acker- und Gemüsebau. Prognose und Monitoring lassen sich wirtschaftlich einsetzen, da die Technologien gratis (Agroscope) bis kostengünstig (private Anbieter) verfügbar sind.

Tabelle 5: Technologien nach Technologiereife und Praxisanwendbarkeit, PSM-Einsparung und Wirtschaftlichkeit. Bei grün hinterlegten Feldern ist ein wirtschaftlicher Einsatz heute möglich, bei braun hinterlegten Feldern noch nicht.

<table>
<tr><td></td><td colspan="3">PSM-Einsparung</td></tr>
<tr><td>Technologiereife & Praxisanwendbarkeit</td><td>Niedrig</td><td>variabel</td><td>hoch</td></tr>
<tr><td rowspan="2">mittel bis hoch</td><td rowspan="2">M2 Lenksysteme Acker & Gemüse (unterstützt M5 Hacken)
M3 GPS-PS-Geräte Acker & Gemüse
M7 Drohnen Obst und Reben</td><td rowspan="2">M1 Prognose & Monitoring Obst & Reben *</td><td>M5 Hacken zwischen Reihen Acker & Gemüse</td></tr>
<tr><td>M4 Spot-Spraying Gemüse und Obst
M5 Hacken innerhalb der Reihen Acker und Gemüse</td></tr>
<tr><td>niedrig bis mittel</td><td></td><td>M1 Prognose & Monitoring Acker & Gemüse *</td><td>M4 Dosierung nach Laubwandvolumen Obst
M6 Mulchroboter Obst & Reben</td></tr>
</table>

Technologiebezeichnungen: M1 Prognose und Monitoring = «Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen», M2 Lenksysteme = «Satellitenbasierte Lenksysteme», M3 GPS-PS-Geräte = «GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit automatischer Teilbreitenschaltung», M4 Spot-Spraying und M4 Dosierung nach Laubwandvolumen = «Sensorgesteuerte bewuchsspezifische Applikation von PSM», M5 Hacken zwischen und innerhalb der Reihen = «Sensorbasierte alternative Beikrautregulierung», M6 Mulchroboter = Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung» und M7 Drohnen = «Drohneneinsatz bei der PSM-Applikation».

** M1 Prognose und Monitoring ist wirtschaftlich einsetzbar, weil die Technologien gratis bis kostengünstig verfügbar sind.*

3 Fazit über sechs Projektjahre

- Einführung der Precision Farming Technologien: Engagierte und, soweit die Technologien es zuliessen, gelungene Einführung von Neuerungen. Die Technologien waren zum Teil nicht so praxisreif wie seitens der Hersteller beschrieben. Die Beratungspersonen und Betriebe benötigten daher zum Teil wesentlich mehr Zeit als veranschlagt. Die wichtigsten Herausforderungen waren die Umsetzung der komplexen Massnahme «Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen», die Aufrechterhaltung der Teilnahmemotivation in dieser Massnahme, sowie die Technologiezuverlässigkeit.
- Betriebsengagement während der Umsetzung: Bereits seit langer Zeit am Markt verfügbare, ausgereifte und verhältnismässig einfach zu bedienende Technologien wurden von den Betriebsleitenden konsequent eingesetzt und Einsatzherausforderungen wie suboptimale Witterung oder Funktionsschwierigkeiten konstruktiv angegangen. Dies umfasst satellitengesteuerte Lenksysteme und Pflanzenschutzgeräte, bewuchsspezifische PSM-Applikation, sensorbasierte Hackgeräte, Mulchroboter und Drohnen. Einzig in der Massnahme 1 «Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen» war das Engagement über die Betriebe und Anbaurichtungen hinweg sehr heterogen. Die Kooperation mit den Betriebsleitenden (Befallskontrollen im Feld, die Umsetzung von Spritzfenstern sowie das zeitnahe Eintragen von Beobachtungen in die Monitoringplattform befallsrisiko.ch und die Rückmeldung an die Beratungspersonen) war durch sehr viel Motivieren, häufiges Nachhaken und in den letzten zwei Jahren durch finanzielle Sanktionierung abhängig von der Kooperation in dieser Massnahme geprägt. Interpretation: Massnahmen müssen einfach und schnell umzusetzen sein und sich gut in den Betriebsablauf integrieren lassen; der anvisierte, für den Betriebsleitenden relevante Nutzen von Massnahmen muss mit hoher Wahrscheinlichkeit erzielt werden; die Wirkung einer Massnahmenumsetzung sollte möglichst umgehend sichtbar sein. In Bezug auf Massnahme 1 kommt den landwirtschaftlichen Beratungszentren mit den Pflanzenschutzbulletins für die landwirtschaftlichen Betriebe eine wichtige Expertenrolle zu: Sie erheben Felddaten auf herkömmliche Art bzw. unterstützt durch digitale Technologien, bereiten sie auf und kommunizieren sie zielgruppengerecht über herkömmliche oder digitale Kanäle an die Betriebe. In etlichen Anwendungsfällen können die Prognose- und Monitoringtechnologien ihr Wirkungspotential nur mit dem entsprechenden Engagement von Fachexperten entfalten.
- Zielerreichung hinsichtlich des Oberziels «Reduktion der PSM-Einsatzmengen in der Summe aller Massnahmen um mindestens 25 %» und der Reduktionsziele für die verschiedenen Technologien: Je nach Kultur, Witterungsverlauf und zur Verfügung stehenden Precision Farming Technologien ist eine Reduktion der PSM-Einsatzmengen um 25 % möglich, lässt sich aber nicht generell erreichen. Die mit den einzelnen Technologien angestrebten Einsparziele konnten partiell realisiert werden. Der Nationale Aktionsplan Pflanzenschutzmittel zielt unter anderem auf eine Halbierung der Risiken von PSM und bezieht sich dabei auch auf PSM-Wirkstoffe, nicht nur auf PSM-Einsatzmengen oder Anzahl an PSM-Anwendungen. Die in diesem Projektbericht nach Kulturen und Herbiziden/Fungiziden/Insektiziden differenziert dargestellten Einsparpotentiale sind hilfreich, um den möglichen Beitrag von Precision Farming Technologien zur Halbierung der Risiken von PSM zu beurteilen. Für ausgewählte Massnahmen wurde die Veränderung der Risiken für Organismen in Oberflächengewässern konkret betrachtet. Die ermittelte Risikoreduktion lag im Bereich von 20 % bis >80 %.
- Aufrechterhaltung der Wirkung: Bei ausreichender Praxisreife, einfacher Praxishandhabbarkeit und nachvollziehbarem positivem Kosten-Nutzen-Verhältnis werden die Technologien nach Aussage der Projektbetriebe weitergehend eingesetzt werden. Ein Teil der Technologien ist ohne finanzielle Förderung selbsttragend, ein Teil unter Ausnutzung der Fördermöglichkeiten wie über Direktzahlungen oder die Strukturverbesserungsverordnung (SVV). Einige Technologien sind nicht selbsttragend, weil für ihren Einsatz (noch) keine Förderung zur Verfügung steht. Im Bereich Prognose und Monitoring (im Projekt Massnahme 1 «Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen») bedarf es weiterhin eines hohen Engagements der Fachexperten aus den landwirtschaftlichen Beratungszentren zur Erhebung, Interpretation und zielgruppengerechten Bereitstellung der Informationen an die

landwirtschaftlichen Betriebe. Es braucht eine entsprechende Bereitstellung von personellen und finanziellen Ressourcen an den Beratungszentren, damit diese Precision Farming Technologien in der landwirtschaftlichen Praxis Wirkung entfalten. Bis nach dem achten Projektjahr wird erhoben werden, welche Massnahmen auf den Projektbetrieben aufrechterhalten wurden.

- Handlungsbedarf: Aufgrund des vorhandenen Potentials zur Reduktion des PSM-Einsatzes wird empfohlen, die Möglichkeiten für eine weitergehende Förderung des Einsatzes von Precision Farming Technologien situativ zu untersuchen. Das massnahmenbasierte, nach Anbauflächen und Einsatzflächen differenzierte Abgeltungsmodell in PFLOPF war einfach, flexibel handhabbar und führte zu einer sicheren Abgeltung für die Projektbetriebe. Aufgrund der witterungsbedingt hohen Ungewissheiten beim PSM-Einsatz und der zum Teil relativ hohen Investitionskosten ist dies ein wichtiger Pluspunkt im Vergleich zu einem wirkungsbasierten Abgeltungsmodell, bei der Abgeltungen nur bei erzielter Wirkung fliessen. Solche Überlegungen sollten in die Gestaltung entsprechender Direktzahlungen einfliessen. Da die Technologieentwicklung u.a. auch durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz rasch voranschreitet: Forschungsorganisationen wie Agroscope und landwirtschaftliche Beratungszentren sollten sich weitergehend koordinieren, um die Entwicklung von Precision Farming Technologien zielgerichtet verfolgen, beurteilen und Handlungsempfehlungen aussprechen zu können. Die Koordination sollte auch die Kommunikationswege umfassen, je einfacher Informationen der Praxis zugänglich sind, desto besser verbreiten sie sich. Ein konsequenter Einbezug der Möglichkeiten von AGRIDEA als landwirtschaftlicher Beratungszentrale der Schweiz scheint sinnig.
- Schweizweite Umsetzung: Die im Projekt eingesetzten Technologien können ohne weiteres schweizweit eingesetzt werden. Die leicht zugängliche Bereitstellung von Informationen zumindest auf Deutsch und Französisch ist hier förderlich, weshalb die Projekterkenntnisse von PFLOPF gezielt zweisprachig auf der Wissensplattform Agripedia von AGRIDEA platziert wurden.

4 Anhang 1: Ökologie – Wirkungsmonitoring

4.1 Massnahme 1 – Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen

Die Voraussetzungen für diese Massnahme sind in den vier im Projekt vertretenen Anbaurichtungen sehr unterschiedlich. Das Wirkungsmonitoring wurde daher individuell angepasst.

4.1.1 Ackerbau

Einführung

Die Möglichkeiten eines reduzierten PSM-Einsatzes mittels Prognosemodellen wurden über die gesamte Projektlaufzeit für Fungizidbehandlungen in Winterweizen und Zuckerrüben analysiert. 2024 erfolgte ausserdem ein Testeinsatz einer neu am Markt verfügbaren digitalen Gelbschale (Magic Trap) in Raps und Zuckerrüben zur Überwachung des Schädlingsbefalls. Für viele Schaderreger gibt es bei diesen Kulturen verlässliche Bekämpfungsschwellen. In der Praxis ist deren exakte Bestimmung jedoch herausfordernd, insbesondere, wenn verschiedene Schläge mit unterschiedlichen Standorten und Sorten zu überwachen sind. Mittels Prognosemodellen kann die Überwachung vereinfacht und eine spezifische Ausführung der gemäss Spritzplan vorgesehenen PSM-Applikationen umgesetzt werden. Ziel von M1 war es, den Betrieben diese Tatsache bewusst zu machen und die PSM-Behandlungen ganz gezielt zu differenzieren und erst dann durchzuführen, wenn es angezeigt ist. Im besten Fall kann so auf einzelne Behandlungen verzichtet werden.

Methodik

Im Rahmen von PFLOPF wurde die internetbasierte Plattform befallsrisiko.ch aufgebaut, in der Landwirte und Beratungspersonen relevante Felder mit Kulturen, Flächendaten, Befallserhebungen und durchgeführten Pflanzenschutzbehandlungen erfassten. In die Plattform eingebunden wurden verschiedene Prognosemodelle zur Vorhersage von Krankheiten bei Winterweizen, Zuckerrüben und Kartoffeln (siehe weiter unten). Um die Modellaussagen für einen Standort zu verfeinern, wurden Daten von lokalen, auf den Projektbetrieben platzierten Wetterstationen integriert. Bei der Planung und Durchführung der Pflanzenschutzmassnahmen wurden die Betriebe intensiv von der Beratung unterstützt. Für die Kommunikation wurde unter anderem eine WhatsApp Gruppe eingerichtet. Die Terminierung der Behandlungen erfolgte in Anlehnung an die Modellempfehlungen, ergänzt durch die von den Beratern durchgeführten Feldbonituren und Spritzfensterauswertungen. Letztere dienten auch zur Evaluation der in Deutschland entwickelten Prognosemodelle Septri (Septoria bei Weizen) und Cercbet (Cercospora bei Zuckerrüben) für Schweizer Bedingungen und Sorten. Die Agroscope-Modelle FusaProg (Fusarien bei Weizen) und PhytoPre (Krautfäule bei Kartoffeln) wurden im Projekt kaum genutzt, weil die Betriebe nur selten gegen Fusarien behandelt haben bzw. der Anteil an Kartoffelflächen gering war. Auf beide Modelle wird daher im Folgenden nicht weiter eingegangen. Der Testeinsatz der digitalen Gelbschale Magic Trap erfolgte auf 30 Rapsfeldern und in 10 Zuckerrübenparzellen. Die automatische Falle kombiniert eine klassische Gelbschale mit einem Kameramodul. Die Kamera macht bis zu zwei Fotos pro Tag von der Fangschale und schickt diese über Mobilfunk zur Auswertung in die Cloud. Die Nutzenden erhalten das Resultat auf der dazugehörigen App. Das System erkennt und zählt die verschiedenen Schadinsekten und meldet das Überschreiten der Bekämpfungsschwelle.

Resultate Fungizidbehandlungen Winterweizen

2020 war auf Grund der warmen und trockenen Verhältnisse in der ersten Jahreshälfte ein schwaches Septoria-Jahr, mit Mehltau gab es gar keine Probleme und gegen Fusarien wäre eine Behandlung nur bei Vorfrucht Mais und pflugloser Bodenbearbeitung angezeigt gewesen. Insbesondere bei robusten Sorten hätte daher in den meisten Fällen eine einzelne Fungizidbehandlung ausgereicht, wie die Auswertung der Spritzfenster im Nachhinein gezeigt hat. Laut der Einträge in befallsrisiko.ch wurden jedoch 61 % der Parzellen zwei- oder sogar dreimal mit Fungiziden behandelt, unabhängig davon, ob es sich um anfällige oder robuste Sorten gehandelt hat. Die Mehrzahl der Betriebe hat demnach 2020 noch nicht nach Sorten differenziert und auch noch auf die herkömmliche Zweifungizidstrategie gesetzt, bei der die erste Behandlung bereits im frühen Schossen (DC31/32) erfolgt. **2021** haben einzelne Betriebe mit einer Spritzung nach dem Modell Septri begonnen, das die erste Behandlung später ansetzt. Mit der zweiten

Behandlung wurde dann aber zum Teil zu lange gewartet oder diese wurde ganz weggelassen, obwohl sie nötig gewesen wäre. Hier fehlte noch die Erfahrung im Hinblick auf die Terminierung der Folgebehandlungen. Zwei Behandlungen nach Septri mit einem Abstand von weniger als 33 Tagen erwiesen sich bei den Feldbonituren am Saisonende trotz des hohen Septoriadrucks als ebenso wirksam wie eine Dreifungizidstrategie mit voller Fungizidschutzabdeckung. Wenige Felder mit guter Abtrocknung (geographische Lage und nicht zu dichte Bestände) erreichten gute Resultate mit nur einem Fungizid im Fahnenblatt-Stadium. Unter diesen Bedingungen wäre nach Septri zu früh behandelt worden und es hätte ein zweites Fungizid gebraucht. **2022** wurde die Erstbehandlung von allen Betrieben gemäss Septri umgesetzt. Die Witterung ähnelte den Verhältnissen 2020, jedoch führten Niederschläge während der Blüte zu Neuinfektionen, die durch die erste Behandlung nicht mehr abgedeckt wurden und grösstenteils eine zweite Behandlung erforderlich machten. Das Einsparpotential war daher in diesem Jahr gering. Nur bei sehr robusten Sorten wie Montalbano hätte eine einzelne Behandlung nach Septri ausgereicht. Das Jahr **2023** war durch anhaltende Nässe im Frühjahr geprägt, was die Befahrbarkeit der Felder stark einschränkte, so dass eine Behandlung gemäss Septri kaum möglich war. Die erste Fungizidapplikation erfolgte durchschnittlich 4,5 Tage nach der Prognose und war damit optimal gesetzt, da der Endbefall durch diese Behandlung gemäss Feldbonituren von 30 % auf 15 % reduziert werden konnte. Eine zweite Behandlung während des Ährenschiebens zeigte in den Spritzfenstern oft kaum noch Wirkung. Auf diese Behandlung hätte demnach auf vielen Feldern verzichtet werden können, zumal es ab Ende der Wachstumsphase trocken und heiss war. **2024** war die gesamte Saison verregnet. Der Septoria-Befall blieb lange tief, stieg ab Anfang Mai aber explosionsartig an. Die Behandlung gemäss Septri war wie im Vorjahr nicht möglich, da die Felder zum Termin nicht befahren werden konnten. Tendenziell erzielte eine zweite Fungizidbehandlung häufig wiederum nur eine geringe Wirkung, auf Grund der grossen Streuung der Daten ist eine Aussage zum Reduktionspotential für 2024 jedoch schwierig.

Resultate Fungizidbehandlungen Zuckerrüben

Zur Entscheidungsunterstützung bezüglich Spritzbeginn gegen Cercospora-Blattflecken gibt es das Modell Cercbet 1 von ISIP. Es prognostiziert den Erstbefall und ruft zur Feldkontrolle auf. Bei der Evaluierung des Programms **2020** (Jahr mit frühem Erstbefall Anfang Juli) lag die Prognose im Durchschnitt etwa zwei Tage vor dem tatsächlichen Befall im Feld, hätte also rechtzeitig angezeigt. Behandelt wurde in diesem Jahr noch nicht nach dem Modell. Spritzstart war bei den meisten Feldern Mitte bis Ende Juli, vereinzelt bereits Anfang Juli oder sogar schon im Juni. Je später mit dem Spritzen begonnen wurde, desto weniger Fungizidbehandlungen wurden durchgeführt. Anfällige Sorten wurden 2020 bis zu viermal im Abstand von 3–4 Wochen behandelt. Bei robusten Sorten, die es seit 2019 bei Zuckerrüben gibt, erfolgten meist zwei Behandlungen, bei frühem Spritzstart auch drei. Zwischen den Spritzungen könnte hier eigentlich je nach Witterung 4–6 Wochen gewartet werden. Da die Betriebe 2020 aber noch nicht viel Erfahrung mit den robusten Sorten hatten, wurden diese teilweise noch wie anfällige Sorten behandelt. Bei Einhaltung des grösseren Abstandes hätte die letzte Spritzung bei robusten Sorten meist nicht erfolgen müssen, da die Ergebnisse der Spritzfenster gezeigt haben, dass der Krankheitsdruck am Saisonende eher gering war. **2021** haben sich die Sporen auf Grund des kühlen Frühlings langsamer aufgebaut, so dass der Erstbefall allgemein später war (Mitte bis Ende Juli). Sobald die ersten Flecken im Feld sichtbar waren, haben die Betriebe das erste Mal behandelt. Insgesamt gab es meist zwei Fungizidbehandlungen, unabhängig von der Anfälligkeit der Sorte und dem Flächenrisiko. Cercbet hat in diesem Jahr durchschnittlich erst sechs Tage nach dem Auftreten der ersten Flecken im Feld angezeigt (Grund: das Modell misst erst ab April, im März gab es aber einige warme Tage, die bei der Temperatursumme fehlen). Wegen des Ausbleibens einer Hitzephase war der Krankheitsdruck jedoch relativ gering und es hätte keine grossen Ausfälle gegeben, wenn nach Cercbet behandelt worden wäre. Die Spritzfenster haben gezeigt, dass auf den meisten Feldern eine einzelne Fungizidbehandlung ausgereicht hätte. **2022** war wie 2020 ein Jahr mit frühem Erstbefall Anfang Juli. Prognose und Feldkontrolle stimmten gut überein und viele Betriebe haben entsprechend dem Modell die erste Behandlung gesetzt. Da es im Anschluss aber relativ trocken und in den Nächten kühl war, hat sich die Entwicklung des Pilzes verzögert. Bis zum Auftreten von Infektionsbedingungen in einer feucht-warmen Phase war der Fungizidschutz der ersten Behandlung abgelaufen, so dass erneut behandelt werden musste. Durch Verzögerung der ersten Behandlung bis zum tatsächlichen Auftreten von Infektionsbedingungen hätte bei robusten Sorten eine einzelne Behandlung gereicht. Anfällige Sorten waren gemäss Spritzfenstern mit zwei Behandlungen ausreichend geschützt. **2023** kam es wieder erst Mitte Juli zu einem effektiven Befall im Feld. Das Modell hat diesen jedoch deutlich früher angezeigt, weshalb viele Erstbehandlungen zu früh erfolgten. Robuste Sorten wurden dadurch zweimal, anfällige bis zu dreimal behandelt. In beiden Fällen hätte laut

Spritzfensterauswertung auf eine Behandlung verzichtet werden können. **2024** verbreitete sich der Pilz auf Grund der anhaltend feucht-warmen Witterung rasant. Die Prognose stimmte auf vielen Feldern wiederum nicht mit dem effektiven Erstbefall Mitte Juli überein, sondern zeigte diesen deutlich früher an. Eine Anpassung der Risikoeinschätzung, die nach der Saison 2023 bei der Dateneingabe ins Modell vorgenommen worden war, hat hier keine Verbesserung gebracht. Im Gegensatz zu den Vorjahren war eine Reduktion des Fungizideinsatzes 2024 nicht möglich, denn sogar bei robusten Sorten reichten zwei Behandlungen nicht aus, um den mittleren Endbefall unter 10 % zu senken. Selbst eine dritte Behandlung führte nicht zum Erfolg.

Resultate automatische Gelbfalle (Magic Trap)

Installation und Inbetriebnahme der Falle sind einfach, die Bedienung der App intuitiv. Die Bildqualität der Kamera ist gut, nur bei Regen gibt es teilweise unscharfe Aufnahmen. Der Erkennungsalgorithmus selbst ist auch bei dieser Falle noch fehleranfällig, Beifänge werden zuverlässig aussortiert, die Unterscheidung von Rapsglanzkäfer und Stängelrüssler funktioniert jedoch nicht. Die gemeldeten Fangzahlen sollten daher anhand der Bilder verifiziert werden. Meldungen zur Überschreitung einer Bekämpfungsschwelle beziehen sich auf Vorgaben in Deutschland und müssen für die Schweiz überprüft werden. Eine Falle kostet derzeit 100–150 Euro. Zusätzlich fallen jährliche Kosten für die App an (ca. 150 Euro). Die Fallen können mit anderen App-Nutzern geteilt werden, die dafür kein Abonnement brauchen. Während des Testeinsatzes sind einzelne Kameramodule ausgefallen. Diese wurden umgehend ersetzt, die Lieferung ist aber bisher nur an Adressen in Deutschland möglich (gilt auch für die Bestellung der Falle).

Diskussion

Herkömmlich werden im intensiven Weizenanbau zwei Fungizidbehandlungen durchgeführt, wobei das erste Fungizid meist im frühen Schossen (DC31-32) zusammen mit Wachstumsreglern appliziert wird. Das ist allerdings nur notwendig, wenn Gelbrost oder Mehltau über der Bekämpfungsschwelle liegen. In den meisten Jahren könnte die erste Fungizidbehandlung im Weizen etwas nach hinten verschoben werden, denn Gelbrost ist auf Grund der vielen nötigen Faktoren im frühen Schossen nur selten ein Problem und gegen Mehltau sind die heutigen Sorten weitgehend resistent. Der Nachteil der frühen Erstbehandlung ist, dass das Fungizid nur 2–3 Wochen wirkt. Wird erst im Fahnenblatt bei anhaltenden Infektionsbedingungen zum zweiten Mal behandelt, ergibt sich eine Lücke im Fungizidschutz. Mit dem Prognosemodell Septri wird die erste Behandlung später gesetzt (oft erst ab DC34) und die Lücke geschlossen, da der Fungizidschutz jetzt etwa 4 Wochen anhält. Nach Ablauf des Schutzes ist ein zweites Fungizid nur notwendig, wenn tatsächlich Infektionsbedingungen (>48 Stunden Feuchtigkeit) herrschen. Bei früher Erstbehandlung sind unter solchen Bedingungen oft drei Applikationen erforderlich, um einen durchgehenden Schutz zu gewährleisten. Im untersuchten Projektzeitraum hätte laut Spritzfensterauswertungen in drei von fünf Jahren durch einen späteren Spritzstart gemäss Prognosemodell jeweils eine Fungizidbehandlung im Weizen eingespart werden können. Potential zur Reduktion bieten insbesondere robuste Sorten wie Montalbano, Diavel oder Spontan, die sehr standfest und widerstandsfähig gegenüber Krankheiten sind. Einsparungen werden jedoch nie auf allen Feldern gleichermassen möglich sein, denn neben Witterung und Sorte spielen auch die Standortbedingungen eine wichtige Rolle. In dichten Weizenbeständen auf schlecht abtrocknenden Feldern ist der Befallsdruck in der Regel höher, so dass hier nicht unbedingt auf eine Behandlung verzichtet werden kann, während es auf anderen Parzellen problemlos möglich ist.

Im Zuckerrübenanbau erfolgen herkömmlich meist zwei Fungizidbehandlungen. Eine Reduktion auf eine einzelne Behandlung ist auch hier möglich, wenn das Augenmerk verstärkt auf die optimale Terminierung des Fungizideinsatzes gelegt wird. Wichtigste Krankheit bei Zuckerrüben ist Cercospora. Der Pilz entwickelt sich bei hoher Luftfeuchtigkeit und mittleren Temperaturen über 20°C. Nach dem Auftreten der ersten Flecken im Juli sollten insbesondere robuste Sorten erst behandelt werden, wenn tatsächlich Infektionsbedingungen herrschen. Der Fungizidschutz hält bei diesen Sorten dann 4–6 Wochen, die man auch tatsächlich abwarten sollte. Relevante Infektionen mit Cercospora sind je nach Witterung noch bis Anfang Oktober möglich. Eine eventuelle zweite Behandlung erfolgt dann Ende August. Wie die Spritzfensterauswertungen im Projekt gezeigt haben, ist diese bei robusten Sorten nur notwendig, wenn es bereits einen deutlichen Befall im Feld gibt. In vier der fünf untersuchten Projektjahre hätte demnach auf die Zweitbehandlung bei robusten Sorten verzichtet werden können. Das Prognosemodell Cercbet 1, das als Entscheidungshilfe zur Terminierung der ersten Behandlung gedacht war, hat sich nur in den beiden Jahren mit frühem Erstbefall Anfang Juli bewährt. Wenn sich die Sporen auf Grund kühler

Witterung langsamer aufgebaut haben, war das Programm zu ungenau und konnte Feldkontrollen nicht ersetzen. Wie beim Weizen wird das Reduktionspotential im Zuckerrübenanbau nicht nur durch Witterung und Sorte beeinflusst, sondern auch durch die Lage eines Feldes. Befindet sich dieses neben einem letztjährigen Zuckerrübenfeld oder trocknet es auf Grund der Topografie schlecht ab, steigt das Befallsrisiko für gewöhnlich.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Das Prognosemodell Septri bietet durch einen späteren Spritzstart Potential zur Reduktion des Fungizideinsatzes im intensiven Weizenanbau. Ob eine reduzierte Behandlung erfolgen kann, wird jedoch massgeblich durch die Witterung, die Lage des Feldes und die angebaute Sorte bestimmt. Die mögliche Gesamtreduktion durch eine optimierte Behandlung wird dementsprechend meist tiefer liegen und von Jahr zu Jahr variieren. Für die untersuchten Projektjahre wurde sie für Weizen über alle Betriebe auf Werte zwischen 5 % und 25 % geschätzt. Der Einstieg in die Nutzung des Modells erfordert eine intensive Beratung. Die Kommunikation über den eingerichteten WhatsApp Chat hat sich dafür sehr bewährt.

Das Zuckerrübenmodell Cercbet ist für Schweizer Verhältnisse zu ungenau und kann Feldkontrollen nicht ersetzen. Die Technologie an sich bietet daher im Moment keine Möglichkeit zur Reduktion des Fungizideinsatzes. Einsparungen sind derzeit nur möglich, wenn Erstbefall und Infektionsbedingungen selbst beobachtet werden, um die Behandlungen optimal zu terminieren. Neben der Witterung spielen hier auch wieder Standortfaktoren und die Anfälligkeit der Sorte eine entscheidende Rolle. Im Projekt schwankte die geschätzte mögliche Gesamtreduktion bei Zuckerrüben zwischen 0 % im Jahr 2024 und 45 % im Jahr 2021.

Bei der Bekämpfung von Schadinsekten kann die digitale Gelbschale “Magic Trap” sehr hilfreich sein. Der Mehrwert der Falle liegt im deutlich reduzierten Zeitaufwand für Feldkontrollen, da sich der Einflugzeitpunkt der Schadinsekten anhand der Kamerabilder sehr gut ermitteln lässt. Die Kenntnis der Populationsdichten ist für die genaue Terminierung des Insektizideinsatzes entscheidend. Einsparungen an PSM sind dadurch jedoch meist nicht möglich, da pro Schaderreger in der Regel nur eine Behandlung erfolgt.

4.1.2 Gemüsebau

Einführung

Die Kulturphänologie ist im Gemüsebau durch den satzweisen Anbau zu einem bestimmten Zeitpunkt sehr unterschiedlich und die Vielfalt an Kulturen fördert zahlreiche Krankheiten und Schädlinge. Der Wechsel von einem symptomfreien Bestand hin zu sehr starkem Befall kann sehr rasch erfolgen. Da bereits leichter Befall zur Unverkäuflichkeit auf Grund der Qualität und damit zu hohen finanziellen Verlusten führt, gib es einen Zielkonflikt zwischen Marktseite und reduziertem PSM-Einsatz. Die Möglichkeit, auf einzelne Behandlungen zu verzichten, ist im Gemüsebau dementsprechend gering, weshalb auf quantitative Auswertungen der Massnahme 1 verzichtet wurde. Das Monitoring konzentrierte sich hier auf das Testen verschiedener Krankheitsmodelle und automatischer Insektenfallen sowie auf die Umsetzung einer digitalen Lösung zur Kommunikation von Befallsinformationen.

Methodik

Im Projekt wurden im Zeitraum 2020–2022 die Krankheitsmodelle MillionCast (Pessl) und Zwipero (ISIP) für Falschen Mehltau an Zwiebeln sowie ein Alternariamodell für Karotten (Pessl) evaluiert. Angeschaut wurde, ob die Modelle die für die Bekämpfung relevanten Infektionszeitpunkte zuverlässig und für die Praxis verständlich modellieren. Bei den Modellen von Pessl konnten firmeneigene Wetterstationen im Feld installiert und die Standortdaten für die Modellierungen verwendet werden. Das ISIP-Modell Zwipero war leider nicht mit den Pessl-Stationen kompatibel. Hier liessen sich nur einzelne offizielle Schweizer Meteostationen einbinden.

Neben den Prognosemodellen wurden diverse Fallen mit automatischer Erkennung zur Vereinfachung des Monitorings von Schadinsekten getestet. Die Insekten werden meist über Pheromone angelockt und entweder direkt beim Einflug in die Falle von einem Sensor gezählt (CapTrap) oder von einer Kamera auf der Klebefläche aufgenommen (TrapView, iScout, Colour Trap, letztere fängt ohne Lockstoff auf einer Leimtafel). Die Datenanalyse erfolgt online.

Einen dritten Schwerpunkt bildete die Weiterentwicklung der im Projekt aufgebauten Plattform befallsrisiko.ch. Die ursprünglich zur Erfassung und Darstellung der Befallssituation im Ackerbau konzipierte Internetplattform wurde für Einträge aus dem Gemüsebau erweitert und 2024 um einen Push-Service aufs Smartphone ergänzt.

Resultate und Diskussion

Die Krankheitsmodelle von Pessl bilden lediglich den IST-Zustand ab, haben aber keine Prognosefunktion, was den Nutzen von vornherein sehr einschränkt. Beim Modell **MillionCast** konnte zwar das Infektionsereignis für den Primärbefall nachträglich bestimmt werden, es fehlen jedoch potente PSM, die effizient nach einer erfolgten Infektion angewendet werden können. Zeitpunkte erhöhter Sporenfreisetzung werden durch die Aufrechnung der Inkubationszeiten gut dargestellt, tatsächliche Daten zum Sporenflug fliessen aber nicht in das Modell ein. In den Projekterhebungen wies es daher eine zu hohe Sensitivität auf, modellierte also starke Infektionsereignisse, ohne dass ein Befall im Feld festgestellt wurde. Ein grosser Nachteil des Modells ist ausserdem, dass der Entwicklungsstand der Kultur nicht mitberücksichtigt wird. So muss der Anwender die nicht anfälligen Kulturstadien selbständig in die Interpretation einbeziehen. Diese ist auf Grund der unübersichtlichen Graphiken generell nicht ganz einfach. Beim **Alternaria-Modell** von Pessl ist die Darstellung der Daten gut verständlich und das Modell dementsprechend grundsätzlich besser für die Praxis geeignet. Grosser Nachteil dieses Modells ist jedoch ebenfalls das Fehlen einer echten Prognosemöglichkeit, also das Verwenden von Wetterprognosedaten. Solange dies nicht angeboten wird, bleibt der Nutzen beschränkt. Das Modell **Zwipero** von ISIP arbeitet mit Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst und extrapoliert 6 Tage in die Zukunft, ist also effektiv ein Prognosemodell. Ausgehend von gemessenen Wetterdaten in der Region und Angaben zu Kulturführung und Kulturstand wird zuerst das Bestandesklima in der Kultur modelliert, darauf aufbauend dann das Sporulations- und Infektionsrisiko. Das Modell hat sich in Deutschland gut etabliert. Für die Schweiz ist es derzeit jedoch nicht nutzbar, da es nicht mit Meteostationen vor Ort kombiniert werden kann. Diese sind als Input für die Modellierung jedoch unerlässlich. In den Versuchen reagierte das Modell äusserst sensitiv. Grösster Schwachpunkt war die Datenarchivierung. Alle Informationen waren nur etwa 10 Tage verfügbar und liessen sich nicht herunterladen. Für die Auswertungen mussten daher monatlich Screenshots gemacht werden.

Wie die Prognosemodelle, haben auch die getesteten **Schädlingsfallen** nicht überzeugt. Teilweise war die Hardware (Gehäuse etc.) mangelhaft oder die Linsen der verbauten Kameras beschlugen mit Wasserdampf. Die Datenübermittlung funktionierte zwar gut, doch die Fotoqualität war unbefriedigend und die Erkennung und Auszählung der Schadinsekten ungenügend. Am schlechtesten funktionierte das Auszählen bei der iScout Colour Trap, da diese ohne Pheromon arbeitet und dementsprechend sehr viel Beifang aufwies. Das Platzieren der Fallen ist im Gemüsebau nicht ganz trivial, denn auf Grund der vielen Pflegedurchfahrten besteht die Gefahr, dass die Fallen durch Unachtsamkeit beschädigt werden.

Mit der **Internetplattform befallsrisiko.ch** sollte den Betrieben die Möglichkeit geboten werden, sich schnell einen Überblick über den Schädlingsdruck in der Umgebung zu verschaffen. Der Nutzen einer solchen Anwendung steigt mit der Zahl der gemeldeten Beobachtungen. Die Dateneingabe, insbesondere das Nachführen der Befallssituation und der erfolgten Pflanzenschutzmassnahmen, war jedoch unübersichtlich und wurde mehrfach bemängelt. In den ersten Projektjahren wurde das Tool daher überwiegend von der Beratung für die Erfassung von Schaderregerdaten genutzt. Durch die Nachprogrammierung des Push-Services ist der Nutzen für die Betriebe etwas gestiegen. Die aktive Benachrichtigung aufs Handy über einen WhatsApp Chat wird grundsätzlich sehr geschätzt. Allerdings ist eine Überflutung mit Nachrichten kontraproduktiv und es besteht bei diesem Ansatz die Gefahr, dass Produzenten auf Grund der Push-Meldungen behandeln, obwohl der Befallsdruck auf ihren Flächen noch nicht so hoch ist.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Da es von der Qualität her keinen Spielraum gibt, ist das Potential für PSM-Einsparungen durch eine Reduktion der Behandlungen im Gemüsebau gering. Etablierte Krankheits- und Prognosemodelle zur Entscheidungsunterstützung gibt es bisher nicht. Bei den getesteten Fallen wurde deutlich, dass halbfertige Produkte auf dem Markt sind und die automatische Erkennung der Schadinsekten im Gemüsebau bis maximal auf Stufe Ordnung funktioniert. Ein Gewinn wäre hier allerdings schon, wenn Gehäuse und Kameras zuverlässig arbeiten und die Fotoqualität eine Auswertung am Bildschirm erlauben würde. Eine georeferenzierte Datenbank für Schaderregerdaten mit gegenseitiger Warnung der Nutzer ist grundsätzlich positiv zu bewerten, die technische Umsetzung muss jedoch verbessert werden. Die Technologieoffenheit der Gemüsebetriebe ist grundsätzlich sehr hoch, die Ansprüche an die Benutzerfreundlichkeit aber ebenfalls. Die Tools müssen vor allem schnell verfügbar, klar in der Aussage und einfach zu bedienen sein. Fehlende Kompatibilität, z. B. zwischen den Anbietern von Wetterstationen und denjenigen von Krankheitsmodellen, sorgt für Unverständnis und hemmt die Verbreitung in der Praxis. Zur optimierten Terminierung von

Fungizidbehandlungen wären Kenntnisse zum Infektionsdruck durch Sporen in der Umgebung sehr hilfreich. Hier könnte die Verwendung von Sporenfallen eine wichtige Informationsquelle darstellen. Diese ermöglichen auch Aussagen dazu, welcher Schaderreger in einer Gegend vorherrschend ist.

4.1.3 Obstbau

Einführung

Im Obstbau gibt es eine Reihe von etablierten Prognosemodellen, die von den Produzenten bereits aktiv genutzt werden. Zusätzliche Informationen erhalten die Betriebe durch das wöchentlich als Pflanzenschutzbulletin veröffentlichte Schädlingsmonitoring der Obstbau-Fachstellen. Auf Grund dieser bereits sehr detaillierten Behandlungsempfehlungen ist das Potential zur weitergehenden Einsparung von PSM im Rahmen von Massnahme 1 eher gering. Hinzu kommt, dass in der Regel vorbeugend bei Ansage von Regenereignissen behandelt wird, was die Einsparung an PSM ebenfalls schwierig macht. Vergleiche zwischen den Jahren sind daher kaum möglich (unterschiedliches Wetter, unterschiedlich viele Witterungsereignisse). Im Rahmen des Wirkungsmonitorings wurde daher auf eine quantitative Auswertung verzichtet und der Schwerpunkt auf den Ausbau der Wetterstationen sowie die Validierung neuer Modelle und Schädlingsfallen durch die Fachstellen gelegt.

Methodik

Auf den Betrieben wurden iMetos Wetterstationen (Pessl) aufgestellt, die neben Temperatur- und Niederschlagsdaten auch Bodenfeuchte und Blättnässedauer aufzeichnen. Windmessung und Frostwarnung sind ebenfalls möglich. Für standortspezifische Prognoseempfehlungen wurden die Stationen mit den bereits von den Produzenten genutzten RIMpro Krankheitsmodellen für Apfelschorf, Apfelmehltau, Marssonina und Feuerbrand verknüpft. Pessl bietet ebenfalls Modelle für diese Krankheiten an. Sie wurden im Rahmen des Projektes evaluiert, ebenso das von Agroscope betreute Schorfmodell VMVenturia.

Neben den Krankheitsmodellen wurden Kamerafallen von TrapView und Pessl (iScout) zur Überwachung von Apfelwickler, Kleinem Fruchtwickler und Marmorierter Baumwanze getestet.

Für die Kommunikation zwischen Beratung und Obstbaubetrieben wurde eine WhatsApp Gruppe eingerichtet, über die auch spezifische Behandlungsempfehlungen ergänzend zu den Pflanzenschutzbulletins gegeben wurden.

Resultate und Diskussion

Die **Wetterstationen** hatten anfangs ein paar technische Störungen, laufen aber inzwischen sehr zuverlässig. Für viele Produzenten sind sie nicht mehr wegzudenken. Besonders die Frostwarnung und die Bodenfeuchtesensoren werden geschätzt, um die Bewässerung anzupassen. Für die Terminierung der Pflanzenschutzbehandlungen werden aber auch die individuellen Regenmengen, die Blattnasszeiten und die Temperaturen beachtet. Die Verknüpfung der Wetterstationen mit den **RIMpro-Modellen** hat die Genauigkeit der Krankheitsprognosen verbessert. Da die Modellberechnungen von den eingehenden Witterungsdaten abhängen, bieten Lokalwerte gegenüber der Standardwetterprognose von RIMpro einen Vorteil. Alternativ besteht die Möglichkeit, die RIMpro-Modelle mit der Wetterprognose von Meteoblue zu verknüpfen. Die RIMpro-Daten werden verständlich aufbereitet, weshalb die Modelle aktiv von den Produzenten genutzt werden. Das **Schorfmodell von Agroscope** erwies sich im Test ebenfalls als zuverlässig, ist für die Produzenten jedoch weniger verständlich und ungewohnt, weshalb sie keine Notwendigkeit sehen, auf dieses neue Prognosetool zu wechseln. Ähnlich verhielt es sich mit den **Modellen von Pessl**.

Die **TrapView** Apfelwicklerfallen erkennen den Falter mittels KI in der Fotofalle sehr gut. Die Fallen laufen zuverlässig, kämpfen jedoch wie die herkömmlichen Deltafallen mit dem Problem, dass die Pheromone bald überall präsent sind und die Wickler weniger zuverlässig in die Fallen gelockt werden. Die Fangzahlen zeigen dementsprechend nicht immer den tatsächlichen Schädlingsdruck. Zudem wurde beobachtet, dass die Insekten teilweise von anderen Räubern auf dem Klebepapier weggefressen werden, wodurch ebenfalls weniger Fallenfänge resultieren. Die Kamerafallen bieten hier jedoch gegenüber herkömmlichen Deltafallen den Vorteil, dass gefressene Falter auf Grund der täglichen Fotos miterfasst werden. Die **iScout-Fallen** von Pessl werden auf der App der Wetterstationen eingelesen und beobachtet (selber Anbieter). Die KI ist auf mehrere Insekten trainiert, so dass die Fallen für verschiedene Schädlinge eingesetzt werden können. Beim Kleinen Fruchtwickler waren die Resultate sehr gut. Der Flug-Höhepunkt konnte auf den Tag genau detektiert werden, so dass eine optimale Terminierung der

Behandlungen möglich war. Da die Wirkungsdauer der Produkte stark abgenommen hat, ist der Behandlungszeitpunkt für den Bekämpfungserfolgt entscheidend. Pessl bietet auch eine iScout-Falle für die Marmorierte Baumwanze an. Das Anlocken der Wanzen mit Aggregationspheromonen funktioniert, die Kamerabilder sind gut und die Erkennung ist auf Grund der Grösse des Insekts auch am Handy einfach.

Für den schnellen Informationsaustausch zwischen den Obstbaubetrieben und der Beratung hat sich der eingerichtete **WhatsApp Chat** gut bewährt. Die Beratung nutzt ihn für aktuelle Pflanzenschutzmeldungen und Befallswarnungen, die von den Produzenten sehr geschätzt werden, aber auch zur Kommunikation von Veranstaltungen, interessanten Informationen oder Hinweisen zu den Wetterstationen. Die Betriebe haben über diesen Kanal die Phänologiestadien für die Kalibrierung der Prognosemodelle gemeldet.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Weitergehende Einsparungen an PSM durch Massnahme 1 sind im Obstbau eher nicht zu erreichen. Die RIMpro-Modelle sind gut etabliert. Besonders das Schorfprogramm wird intensiv genutzt. Da es zuverlässig funktioniert und gut verständlich ist, besteht keine Notwendigkeit, auf ein anderes Modell zu wechseln. Einen Mehrwert für die Terminierung von Pflanzenschutzbehandlungen bieten den Betrieben lokale Wetterstationen mit zusätzlichen Blattnässesensoren. Ausstattungen wie Frost- oder Bodensensoren werden für die Steuerung der Bewässerung geschätzt. Die im Projekt getesteten Fallen eignen sich für den Gebrauch, sind aber für die Obstbauern wenig interessant. Sie verlassen sich stark auf die Empfehlungen des Bulletins und die WhatsApp Meldungen sowie auf die regulären Flugzeiten der Schadinsekten. Da die eigenen Parzellen regelmässig besucht werden, kann der Insektenflug auch gut und deutlich günstiger mit herkömmlichen Deltafallen überwacht werden. Für die Beratung wären die automatischen Kamerafallen an wenigen Hotspots interessant, da die Flugkurven am Bildschirm verfolgt werden können.

4.1.4 Rebbau

Einführung

Im Rebbau gibt es nur wenige wichtige Schaderreger. Viele Betriebe verzichten daher bereits auf Insektizide, Akarizide und Herbizide. Für die Hauptkrankheiten sind keine Schadschwellen definiert. Der Pflanzenschutz ist im Vergleich zu anderen Kulturen einfach und viele für M1 formulierte Technologien wie Wetterstationen und Prognosemodelle sind seit langem etabliert und werden von den Betrieben und der Beratung genutzt. Zusätzlich informiert das Pflanzenschutzbulletin alle 2 Wochen über die aktuelle Befallssituation. Potential zur weiteren Optimierung der Behandlungen bieten die im ÖLN geforderte Dosierung nach Laubwandvolumen (LWV) sowie der Ausbau der Wetterstationen, da ein dichteres Messnetz gegebenenfalls spezifischere Vorhersagen der Krankheitsprognosemodelle für kleinräumigere Gebiete ermöglicht. Das Wirkungsmonitoring hat sich hauptsächlich auf diese beiden Punkte konzentriert. Zusätzlich wurden alternativ vorhandene Prognosemodelle auf ihre Praxistauglichkeit geprüft.

Methodik

Um die Möglichkeiten einer PSM-Reduktion durch Anpassung der Aufwandmenge an das Laubwandvolumen (LWV) zu optimieren, wurde in den Jahren 2020–2022 auf insgesamt 8 Rebenparzellen jeweils die Entwicklung der Laubwand zwischen Mai und August erfasst. Mit dem auf Agrometeo verfügbaren Modell «Angepasste Dosierung» (https://www.agrometeo.ch/de/weinbau/angepasste-dosierung) wurde für jeden Behandlungstermin im Nachhinein die optimale Brühemenge berechnet und mit der tatsächlichen Aufwandmenge verglichen. Zusätzlich wurden für alle Parzellen die potenziellen akuten Risiken für Organismen in Oberflächengewässern ermittelt, basierend auf den tatsächlichen und den theoretisch gemäss Modell applizierten Wirkstoffmengen. Berücksichtigte Eintragspfade sind Drift, Oberflächenabfluss und Drainage.

Im Hinblick auf eine Verdichtung des Messnetzes wurde eine günstige Wetterstation der Marke PESSL (Typ Eco D3) auf ihre Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit getestet. Die Station wurde direkt neben einer CAMPBELL-Station aus dem Agrometeo Messnetz von Agroscope installiert und die von beiden Stationen aufgezeichneten Messwerte für Temperatur, Niederschlag, Blattnassdauer und relative Luftfeuchtigkeit miteinander verglichen. Allfällige Unterschiede in den Messwerten wurden im Hinblick auf ihren Einfluss auf das Standard-Prognosemodell für Falschen Rebenmehltau (Vitimeteo von Agrometeo) geprüft. Als Alternativen zu Vitimeteo wurden die Modelle

VineForecast, LeovaSmart und Databaum bezüglich Funktionalitäten, Handhabung und Verständlichkeit angeschaut.

Resultate und Diskussion

Das theoretische Einsparpotential durch eine **Anpassung der Dosierung an das vorhandene Laubwandvolumen** jeder Parzelle wurde exemplarisch für das Jahr 2021 ermittelt. Betrachtet wurde der PSM-Einsatz gegen Falschen Mehltau, die Einsparungsraten gelten jedoch auch für Behandlungen gegen Echten Mehltau. Auf den vier in diesem Jahr erfassten Parzellen lag die mögliche Einsparung zwischen 35 % und 54 %. Die Höhe variierte in Abhängigkeit vom Vegetationsstadium und lag im Mittel über alle vier Parzellen zwischen 65 % während der Entwicklung der Blütenknospen (BBCH 55) und 27 % während der Traubenentwicklung (BBCH 73). Voraussetzung für das Erreichen dieser beträchtlichen Einsparungsraten ist der Einsatz eines modernen Sprühgerätes mit einer hohen Anlagerungsqualität, das vor jeder Behandlung richtig eingestellt wird. Wichtig ist ausserdem, dass jede einzelne Gasse behandelt wird, da das Agrometeo-Modell auf dieses Vorgehen ausgelegt ist. Gemessen über alle Jahre (2020–2022) wurden auf den Rebenparzellen durchschnittlich 17 kg/ha Fungizid-Wirkstoffe appliziert. Durch eine Anpassung der Dosierung an das Laubwandvolumen hätten rund 44 % dieser Wirkstoffmengen eingespart werden können. Das akute Toxizitätsrisiko für aquatische Organismen hätte sich dadurch um rund 33 % reduziert. Es ist für die Betriebe aus arbeitswirtschaftlichen Gründen nicht möglich, die Ausbringmenge auf jeder einzelnen Parzelle und bei jeder Spritzung an das Laubwandvolumen anzupassen. Daher ist die berechnete Einsparung ein theoretischer Maximalwert.

Der **Vergleich der Wetterstationen** zeigte, dass die PESSL-Station die Temperaturen im Vergleich zur Referenzstation überschätzt, vor allem in der für den Pflanzenschutz kritischen Phase (April bis August). Dies dürfte mit der Bauart des Gerätes zusammenhängen. Die höheren Temperaturen könnten zu früheren oder stärkeren Infektionen im Vitimeteo-Modell führen. Die Niederschlagswerte der beiden Stationen differierten nie mehr als 5 mm pro Tag und dürften das Modell nur wenig beeinflussen. Bei der Blattnässe mass die PESSL-Station regelmässig längere Dauern als die CAMPBELL-Station, bei der relativen Luftfeuchtigkeit waren die Werte durchgehend leicht tiefer. Beides könnte ebenfalls Unterschiede in der Modellberechnung bewirken. Trotz der Differenzen in den gemessenen Daten waren die Modelloutputs der beiden Stationen hinsichtlich Sporenreife, erster Bodeninfektionen und Zahl der Infektionstage vergleichbar. Die PESSL-Station meldete jedoch deutlich mehr schwere Infektionstage. Ein fiktiver Behandlungsplan basierend auf den Modelloutputs ergab, dass nur der Behandlungsbeginn Ende April und ein Behandlungstermin während der Blüte nicht übereinstimmend waren. In beiden Fällen wären 8 Behandlungen zwischen Ende April und Anfang August erfolgt. In der Praxis könnte der Unterschied in den Mess- und Modelldaten daher nur eine untergeordnete Rolle spielen. Regionale sowie mikroklimatische Gegebenheiten scheinen einen grösseren Einfluss auf die Modellprognose und die Behandlungsintensität zu haben als der Wetterstationstyp. Technisch gesehen hatten die PESSL-Stationen einige Probleme mit der Datenübertragung und mit Sensorausfällen.

Die **Prüfung der alternativen Prognosemodelle** LeovaSmart, VineForecast und Databaum ergab, dass diese nicht denselben Detailgrad wie das Standardmodell Vitimeteo bieten. Gewisse Funktionalitäten der anderen Modelle könnten aber auch Vitimeteo noch besser machen (z. B. Berechnung der Wirkungsdauer, Performance der Homepage oder der App).

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Die Umsetzung einer Dosierung nach Laubwandvolumen auf allen Parzellen eines Betriebes ermöglicht deutliche Einsparungen bei PSM, vor allem zu Saisonbeginn. Das Toxizitätsrisiko für Gewässerorganismen auf Grund von Wirkstoffeinträgen kann so ebenfalls deutlich verringert werden. Eine separate Messung der Laubwand in jeder Parzelle und eine dementsprechende Anpassung der Dosierung auf Parzellenebene ist bei den vorhandenen Schlag- und Betriebsgrössen jedoch unrealistisch. In der Praxis wird man sich nach dem Schlag mit dem grössten Laubwandvolumen richten müssen, um Unterdosierungen zu vermeiden. Damit die geringeren PSM-Mengen ausreichend wirksam sind, ist ausserdem eine optimale Applikationstechnik und die Anpassung (Ausrichtung der Düsen) derselben an die jeweilige Parzelle notwendig, was in der Praxis einerseits nicht immer umgesetzt wird (Behandlung jeder Reihe) und andererseits technisch nicht immer möglich ist (Terrassenanlagen). Trotzdem sollte man diesen Punkt seitens Forschung und Beratung nochmals aufgreifen und die Produzenten darauf hinführen. Eine

Pflanzenschutzspritze, die die Aufwandmenge automatisch an das Laubwandvolumen anpasst, würde eine praktikable Lösung bieten, im Projekt stand jedoch keine geeignete Technologie zur Verfügung.

Bei den Wetterstationen zeigten sich vor allem bei Temperatur und Blattnässe deutliche Unterschiede, die sich auch auf die Krankheitsmodelle auswirkten. Die Abweichungen bei den Prognosen haben in der Praxis aber eher wenig Einfluss auf die Behandlungsintensität, da ab einem gewissen Zeitpunkt meist nach Blattzuwachs oder Niederschlag behandelt werden muss, um alle wichtigen Krankheiten abzudecken.

Bei den Prognosemodellen für Falschen Mehltau ist Vitimeteo das derzeit beste Produkt, auch wenn jedes der alternativen Modelle in einzelnen Bereichen Vorteile gegenüber dem Standardmodell bietet.

Das grösste Potential zur PSM-Reduktion im Rebbau bietet derzeit die Umstellung auf Piwi-Sorten, die robust gegenüber Pilzkrankheiten sind. Je nach Niederschlagsverhältnissen sind bei diesen oftmals zwei bis vier Fungizidbehandlungen ausreichend. Somit können rund 50–70 % der üblicherweise eingesetzten PSM eingespart werden.

4.2 Massnahme 2 – Satellitenbasierte (GPS-) Lenksysteme zur Minimierung der Fahrgassenüberlappung

Methodik

Die Einsparung an PSM lässt sich durch den Vergleich der Arbeitsbreitenüberlappung mit und ohne Lenksystem ermitteln. Dafür wurden die Fahrgassenabstände in aktuellen Drohnenfotos von PFLOPF-Parzellen mit gut sichtbaren Pflegefahrgassen sowie in Luftbildern dieser Parzellen aus der Zeit vor dem Lenksystemeinsatz gemessen. Alle Messwerte wurden jeweils mit dem Soll-Wert (= Arbeitsbreite der Spritze) verglichen und die prozentuale Überlappung berechnet. Die Auswertung basiert auf Daten von 35 Parzellen, verteilt auf 21 Betriebe mit diversen Kulturen und Pflegearbeitsbreiten. Da alle Parzellen mehr oder weniger eben waren, ist eine Verzerrung der Messwerte auf Grund der Hangneigung zu vernachlässigen. Die unterschiedliche Bodenauflösung von Drohnenfotos (2,5 cm) und Luftbildern (10 cm und 25 cm) hatte keinen signifikanten Effekt auf die gemessenen Fahrgassenabstände.

Resultate

Abbildung 1 zeigt, dass ohne Lenksystem die Streuung der Arbeitsbreitenüberlappung sehr gross ist. Sie reicht von maximal 8 % Überlappung bis hin zu Fehlstellen von 4–6 %, die nicht gespritzt wurden. Im Mittel gab es ohne Lenksystem eine Überlappung von etwa 2 %, was bei den gängigen Pflegearbeitsbreiten von 15 m und 21 m einem Streifen von 30 cm bzw. 42 cm entspricht, der jeweils doppelt gespritzt wurde. Bei Nutzung eines automatischen Lenksystems zum Anlegen der Pflegefahrgassen reduzierte sich die Überlappung und damit die eingesetzte Menge an PSM auf den untersuchten Parzellen um ca. 1,5 % (Unterschied der Mediane). Die Abweichung zwischen dem gemessenen Abstand der Pflegefahrgassen und der Arbeitsbreite der Pflanzenschutzspritze lag im Mittel noch bei etwa 0,5 %.

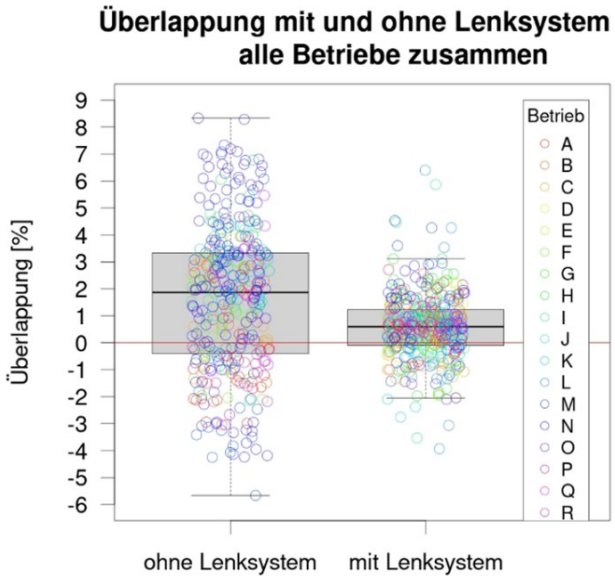


Abbildung 1: Prozentuale Überlappung der Pflegearbeitsbreiten ohne und mit Lenksystem-Einsatz. Daten von 35 Parzellen, verteilt auf 21 Betriebe mit diversen Kulturen und Pflegearbeitsbreiten.

Diskussion

Die im Projekt ermittelte durchschnittliche Überlappung von 0,5 % beim Anlegen der Pflegefahrgassen mit automatischem Lenksystem liegt über dem aus der Literatur bekannten Wert von 0,2 % (Reckleben und Noack, 2012). Eine Ursache hierfür ist die bewusste Entscheidung der Landwirte, nicht die volle Sä-Arbeitsbreite zu nutzen. Insbesondere beim Getreide wurde oftmals mit 2,98 m statt mit 3 m gesät, was bei einer 15 m-Spritze unweigerlich eine Überlappung von 10 cm zur Folge hat. Das Vertrauen in die Technik muss offensichtlich noch weiter reifen, um in der Praxis auf diese “Sicherheit” zu verzichten. Das bei Gesuchserstellung angenommene PSM-Reduktionspotenzial von 3 % durch den Einsatz des Lenksystems wurde im Projekt nicht erreicht, da die Überlappung ohne Lenksystem im Mittel nur 2 % betrug. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sich eher die “besseren” Betriebe am Projekt beteiligen und der gesamtschweizerische Durchschnittswert höher liegt. Reckleben (2015) gibt an, dass Überlappungen beim Anlegen der Fahrgassen ohne Lenksystem von drei bis vier Prozent üblich sind. Demnach können durch die Nutzung eines Lenksystems durchaus auch höhere Einsparungen erzielt werden als die im Projekt ermittelten 1,5 %.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Die Reduktion des PSM-Einsatzes durch die Nutzung eines automatischen Lenksystems ist mit durchschnittlich 1,5 % relativ gering. Allerdings profitiert jede Überfahrt für den Pflanzenschutz von den exakten Fahrgassen (also sämtliche Herbizid-, Fungizid- und Insektizid-Behandlungen) und auch beim Düngen mit derselben Arbeitsbreite wird der Mittelaufwand in gleichem Masse pro Überfahrt reduziert. Die gerade angelegten Pflanzenreihen erlauben ausserdem einen hinsichtlich Flächenleistung und Verschüttungswirkung effizienteren Einsatz von nachfolgenden mechanischen Hackgeräten; hier bieten die automatischen Lenksysteme also einen Hebel zur Auslösung weitergehender PSM-Reduktionen.

4.3 Massnahme 3 – GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltung

Methodik

Die Einsparung an PSM wurde auf vier PFLOPF-Betrieben durch den Vergleich der überlappenden Fläche bei Handschaltung und automatischer Schaltung der Teilbreiten ermittelt. Auf insgesamt sechs Parzellen mit möglichst unregelmässiger Form erfolgten jeweils zwei Überfahrten mit der betriebseigenen Pflanzenschutzspritze, wobei die Teilbreiten einmal manuell und einmal automatisch geschaltet wurden. Der Fahrweg der Spritze und die Aktivität der Düsen wurden jeweils mittels RTK-GPS auf dem Spritzbalken und Ultraschallsensoren vor den Spritzdüsen aufgezeichnet. Für die Auswertung der Daten wurde ein GIS-Modell entwickelt, mit dem die überlappenden Bereiche graphisch dargestellt und ihr Anteil an der Gesamtfläche berechnet werden konnten. Die von der jeweiligen

Pflanzenschutzgerätetechnologie komplett unabhängige Monitoringmethode erlaubt eine identische Messung der Geräte unabhängig vom Gerätehersteller und Gerätetyp.

Resultate

Bei 15 m Arbeitsbreite der Spritze konnte die Überlappung durch die automatische Schaltung der Teilbreiten auf einer von drei Parzellen etwas verringert werden (-0,7 %). Auf den anderen beiden Parzellen war der Anteil der überlappenden Fläche bei Automatikschaltung hingegen etwas grösser als bei Handschaltung (+1,7 % bzw. +2 %). Beim Einsatz einer 18 m Spritze auf einer sehr schmalen Parzelle wurde durch die automatische Teilbreitenschaltung eine Reduktion der überlappenden Fläche um 3,5 % erreicht. Allerdings wurde ein kleiner Bereich der Parzelle mit der Automatikschaltung nicht gespritzt, so dass die Reduktion auch etwas tiefer liegen könnte. Die Parzelle, auf der eine Spritze mit 21 m Arbeitsbreite zum Einsatz kam, zeigte im Hinblick auf die überlappende Fläche keinen Unterschied zwischen Hand- und Automatikschaltung, während eine 22 m Spritze mit automatischer Teilbreitenschaltung auf einer anderen Parzelle zu einer Reduktion der Überlappung in Höhe von 3,9 % führte. Bei Handschaltung gab es auf dieser Parzelle nicht nur mehr Überlappungen, sondern auch einige ungespritzte Bereiche (Tabelle 6).

Tabelle 6: Anteil der überlappenden Fläche bei manueller und automatischer Schaltung der Teilbreiten. Datenaufnahme auf sechs unregelmässig geformten Parzellen, Spritzenarbeitsbreite 15–22 m.

Arbeitsbreite Spritze (m)	Anzahl und Grösse der Teilbreiten	Düsen pro Teilbreite	Überlappung bei manueller Schaltung (%)	Überlappung bei Automatik-Schaltung (%)*	Grösse Parzelle (ha)	Bemerkung
15	5 x 3 m	6	3,0	2,3 (-0,7)	3,4	gleicher Fahrer auf beiden Parzellen
15	5 x 3 m	6	3,6	5,3 (+1,7)	3,2	
15	5 x 3 m	6	12,7	14,7 (+2,0)	0,5	
18	2 x 3 m (aussen) 3 x 4 m (innen)	2 x 6 (aussen) 3 x 8 (innen)	9,9	6,4 (-3,5)	1,0	ein Bereich bei Automatik-schaltung ungespritzt
21	7 x 3 m	6	6,6	6,5 (-0,1)	1,0	
22	2 x 3,5 m (aussen) 5 x 3 m (innen)	2 x 7 (aussen) 5 x 6 (innen)	7,5	3,6 (-3,9)	3,0	bei Handschal-tung mehrere Fehlstellen

**Unterschied zur manuellen Schaltung in Klammern.*

Diskussion

Die Reduktion der überlappenden Fläche entspricht der Reduktion der PSM-Menge durch den Einsatz der automatischen Teilbreitenschaltung. Die erzielte Einsparung lag zwischen 0,1 % und 3,9 % und damit im formulierten tiefen Zielbereich von 2 %. Auf zwei der sechs untersuchten Parzellen war der Anteil an Überlappungen bei Automatikschaltung sogar etwas höher als bei manueller Schaltung der Teilbreiten. Es ist bekannt, dass auf kleinen Feldern im Verhältnis mehr Wendevorgänge erforderlich sind als auf grösseren Parzellen, was bei Handschaltung in der Regel zu einem höheren Anteil an Überlappungen führt. Mit einer Ausnahme (3 ha-Parzelle mit 7,5 % Überlappung bei Handschaltung) bestätigen die vorliegenden Messungen diesen Zusammenhang. Dementsprechend würde man für die kleineren Parzellen ein höheres Reduktionspotential durch die automatische Teilbreitenschaltung erwarten als für die grösseren Felder (Handler et al., 2010), was für die hier ermittelten Einsparungen jedoch nicht zutrifft. Im Gegenteil: Auf der kleinsten Fläche (0,5 ha) wurden für die Automatikschaltung 2 % mehr Überlappung ermittelt als für die Handschaltung, während die grösste Reduktion auf einer 3 ha grossen Fläche erreicht wurde. Dies zeigt, dass neben der Flächengrösse noch andere Faktoren eine Rolle spielen, allen voran die Schlagform, da exaktes manuelles Schalten bei nicht rechteckigen Feldern mit keilförmigen Bereichen und schräg verlaufendem Vorgewende schwieriger ist und je nach Fahrer und Spritzen-Arbeitsbreite zu grösseren

Überlappungen führt. Einen Einfluss auf die Reduktion hat auch der gewählte Überlappungsgrad bei Verwendung einer automatischen Teilbreitenschaltung. Er bestimmt, ob die Teilbreite sofort abgestellt wird, wenn die erste Düse einen bereits bearbeiteten Bereich überfährt (Überlappungsgrad 0 %) oder erst, wenn die Hälfte (50 %) oder alle Düsen (100 %) in diesem Bereich sind. Hier kommt auch zum Tragen, wie viele Düsen zu einer Teilbreite gehören. Je weniger es sind, um so feiner kann die Abstufung erfolgen, weshalb Einzeldüsenschaltungen ein höheres Reduktionspotential aufweisen als die im Projekt untersuchten Spritzen mit 3 m grossen Teilbreiten, bei denen jeweils 6 Düsen gemeinsam ein- oder ausgeschaltet werden. Der Landtechnikhersteller AMAZONE gibt für eine Spritze mit 24 m Arbeitsbreite und 7 automatisch geschaltete Teilbreiten eine mögliche Reduktion an PSM von 5 % an, für eine 24 m Spritze mit Einzeldüsenschaltung (Düsenabstand 50 cm) hingegen 10 % (AMAZONE Einzeldüsenschaltung). Eigene Kalkulationen ergaben ebenfalls, dass die PSM-Einsatzmenge durch Nutzung einer Einzeldüsenschaltung um weitere 5 % reduziert werden kann, verglichen mit der automatischen Schaltung von 3 m grossen Teilbreiten.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

GPS-gesteuerte Pflanzenschutzspritzen mit automatischer Schaltung der Teilbreiten sind für die eher kleinen und oft unregelmässig geformten Felder in der Schweiz durchaus interessant und sinnvoll, zumal sämtliche Behandlungen mit Herbiziden, Fungiziden und Insektiziden von der Technologie profitieren.

Die Reduktion des PSM-Einsatzes liegt aber sicher nur im einstelligen Prozentbereich. Bei herkömmlichen Teilbreiten mit 6 Düsen im Abstand von 50 cm wurden im Maximum knapp 4 % Einsparung erzielt. Je nach Feldgrösse, Schlagform und Arbeitsbreite der Spritze kann diese aber auch geringer, manchmal vielleicht etwas höher ausfallen. Spritzen mit Einzeldüsenschaltung ermöglichen etwa 5 % zusätzliche Reduktion, sind jedoch auf Grund der hohen Anschaffungskosten bisher kaum verbreitet. Ein aus ökologischer Sicht sehr wertvoller Aspekt von Spritzen mit automatischer Teilbreitenschaltung ist die Möglichkeit, durch das präzise Schalten am Feldrand unerwünschte Austräge von PSM im Bereich von entwässerten Wegen zu verhindern.

4.4 Massnahme 4 – Bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik

Methodik

Die Massnahme umfasst verschiedene Technologien. Im **Acker- und Gemüsebau** umgesetzt wurden die Unkrautbehandlung mittels **Spot-Spraying** in Zuckerrüben und Zwiebeln (Ecorobotix-ARA) sowie die Spot-Behandlung von Eisbergsalat mit Fungiziden und Insektiziden (Spot-Spraying System auf Kamerahacke). Zur Ermittlung der PSM-Einsparung wurde die Aktivität einzelner Düsen anhand der Schaltung der Magnetventile aufgezeichnet (ARA: 10 Düsen, Messfrequenz 100Hz; System auf Hacke: 6 Düsen, Messfrequenz 10Hz) und der Anteil der tatsächlichen Düsenöffnung ins Verhältnis gesetzt zu einer durchgehenden Öffnung der Düsen. Die Messungen in Zuckerrüben erfolgten einmalig bei einem Testeinsatz des Ecorobotix-ARA ausserhalb von PFLOPF, da projektinterne Ackerbaubetriebe das Gerät nicht genutzt haben. Die Parzelle war nach mehreren flächigen Herbizidapplikationen zum Zeitpunkt der Spot-Behandlung nur sehr wenig verunkrautet. Die Messungen in Zwiebeln umfassten eine Parzelle mit vier Wiederholungen und erfolgten bei drei der fünf durchgeführten Spot-Spraying Behandlungen mit Herbiziden. Auch auf dieser Parzelle war der Unkrautdruck durch vorgängige Flächenbehandlungen reduziert worden. Salatbehandlungen mit Fungiziden und Insektiziden wurden auf acht verschiedenen Parzellen in kleinem, mittlerem oder grossem Salat erfasst (Alter ca. 1, 2 oder 3 Wochen). Für die Zwiebel- und Salatparzellen wurden zusätzlich die potenziellen akuten Risiken für Organismen in Oberflächengewässern ermittelt. Dem tatsächlichen Spritzplan mit dem durch das Spot-Spraying reduzierten PSM-Einsatz wurde dafür ein theoretischer Spritzplan gegenübergestellt, bei dem sämtliche Applikationen als Flächenbehandlungen erfolgten. Berücksichtigte Eintragspfade sind Drift, Oberflächenabfluss und Drainage.

Im **Obstbau** wurden die Möglichkeiten der PSM-Reduktion durch eine **automatische Anpassung der Applikationsmenge von Fungiziden und Insektiziden an das Laubwandvolumen** untersucht. Die dafür im Projekt angeschaffte Inovel-Spritze verfügt über 4 Lidar-Sensoren zum Abtasten der Laubwand. Die Teilbreiten der Spritze und die Ausbringmenge werden automatisch geregelt. Das Gerät wurde 2021–2023 auf einer gedeckten Versuchsparzelle mit unterschiedlichen Apfelsorten eingesetzt, ab August 2023 auf zwei Parzellen einer Mostobstanlage ohne Hagelschutz. An diversen Terminen (Versuchsparzelle: 6, Mostobst: 2) erfolgten jeweils zwei

Durchfahrten nacheinander auf der gleichen Parzelle, einmal mit manueller Schaltung am Anfang und Ende der Reihen und einmal im Automatikmodus der Spritze. Jede Fahrt wurde in einem Online-Tagebuch aufgezeichnet und die dort hinterlegten Ausbringmengen gegenübergestellt. Auf den beiden Parzellen der Mostobstanlage erfolgten zusätzlich zwischen April und Oktober 2024 jeweils neun Pflanzenschutzbehandlungen ausschliesslich im Automatikmodus der Spritze. Die Ausbringmengen dieser Fahrten wurden mit der 2023 ermittelten Menge bei Handschaltung verglichen, um die Einsparung im Jahresverlauf zu ermitteln.

Als weitere Technologie im **Obstbau** wurde ab 2024 auf einem Betrieb die **Punktspritzung von Herbiziden** im Stammbereich von Apfelbäumen umgesetzt. Das Einsparpotential gegenüber einer durchgehenden Bandapplikation entlang der Baumreihen wurde für Baumabstände von 80, 100 und 120 cm ermittelt, indem entlang der Reihen auf einer Länge von 2 x 10 m der Anteil der ungespritzten Bereiche ausgemessen wurde.

Resultate Spot-Spraying Acker- und Gemüsebau

Für die einmalige Spot-Behandlung von Unkräutern auf einer **Zuckerrübenparzelle** mit geringem Unkrautdruck wurde anhand der Düsenaktivität eine Herbizideinsparung von 96 % gegenüber einer Flächenspritzung ermittelt. Auf der **Zwiebelparzelle** erfolgten insgesamt 10 Unkrautbehandlungen, fünf davon als Spot-Spraying. Pro Spot-Behandlung reduzierte sich der Herbizideinsatz um mindestens 83 %, im Mittel lag die Reduktion im Vergleich zur Flächenspritzung bei 91 %. Die Einsparung nahm mit jeder Behandlung zu, da der Unkrautdruck infolge der Spritzungen zurückging. Gemessen über alle 10 Herbizidapplikationen reduzierte sich die ausgebrachte Wirkstoffmenge um 57 %. Die potenziellen Risiken für aquatische Organismen, insbesondere höhere Pflanzen, Algen und Cyanobakterien, verringerten sich dadurch um 19 %. Ein Grossteil der berechneten Risiken entfiel auf den Wirkstoff Pendimethalin, der im Produkt Stomp Aqua in einer Flächenapplikation ausgebracht wurde. Der reduzierte Einsatz anderer Wirkstoffe bei der Spot-Applikation konnte das Gesamtrisiko daher nur mässig beeinflussen.

Auf den acht **Salatparzellen** erfolgten jeweils zwei oder drei Fungizid- und Insektizidbehandlungen, eine oder zwei davon als Spot-Spraying. Die Möglichkeit zur PSM-Einsparung ist von der Grösse der Salatpflanzen abhängig. Bei der Behandlung von kleinen Salatpflanzen (7 Tage alt, Durchmesser 12 cm) reduzierte sich der Einsatz an Fungiziden und Insektiziden um durchschnittlich 66 % gegenüber einer durchgehenden Behandlung der Salatreihen. Bei mittlerem und grossem Salat (12 und 20 Tage alt, Durchmesser 16 cm bzw. 22 cm) betrug die Reduktion 51 % bzw. 31 %. Für die Einsparung über die gesamte Kulturdauer ist neben dem Behandlungszeitpunkt auch das Verhältnis zwischen Flächen- und Spot-Behandlungen entscheidend. Im Durchschnitt reduzierte sich die eingesetzte Wirkstoffmenge auf den Salatparzellen um 35 % (Fungizide: 31 %, Insektizide: 41 %). Die berechneten akuten potenziellen Risiken für Gewässerorganismen lagen insgesamt 59 % niedriger, wobei sich auf Grund der höheren Toxizität insbesondere die Risiken reduzierten, die von Insektizideinträgen ausgehen (Risikoreduktion Fungizide: 4 %, Insektizide: 76 %).

Resultate automatische Ausbringmengenanpassung Obstbau

Für die gedeckte Versuchsparzelle mit unterschiedlichen Apfelsorten ergab der direkte Vergleich der Ausbringmengen eine Reduktion des Fungizid- und Insektizideinsatzes von maximal 10 %. Im Durchschnitt über alle sechs Termine lag die Einsparung durch die automatische Ausbringmengensteuerung der Spritze bei lediglich 4,9 %. Ein bisher unüberwindbares Problem sind die Pfähle der Hagelschutznetze, die von der Spritze nicht erkannt und daher jeweils mitbehandelt werden. In der Mostobstanlage ohne Witterungsschutz wurden bei den beiden Vergleichsfahrten Einsparungen zwischen 20 % und 38 % erzielt, die durchschnittliche Reduktion lag bei 27 %. Der Vergleich der zwischen April und Oktober 2024 aufgezeichneten Ausbringmengen, die von der Spritze automatisch an das Laubwandvolumen angepasst wurden, mit der 2023 ermittelten Ausbringmenge bei Handschaltung ergab für Behandlungen im April eine durchschnittliche Reduktion von 17 %. Im Mai lag die Reduktion im Mittel noch bei 10 % und bei Behandlungen ab Mitte Juni wurde keine Einsparung mehr erreicht. Ab diesem Zeitpunkt waren die Werte sogar negativ, was darauf hindeutet, dass die Ausbringmengen 2024 generell etwas höher waren als der für den Vergleich genutzte Referenzwert von 2023, vergleiche Abbildung 2. Die Einsparungen zu Beginn der Saison würden in diesem Fall dann auch etwas höher ausfallen.

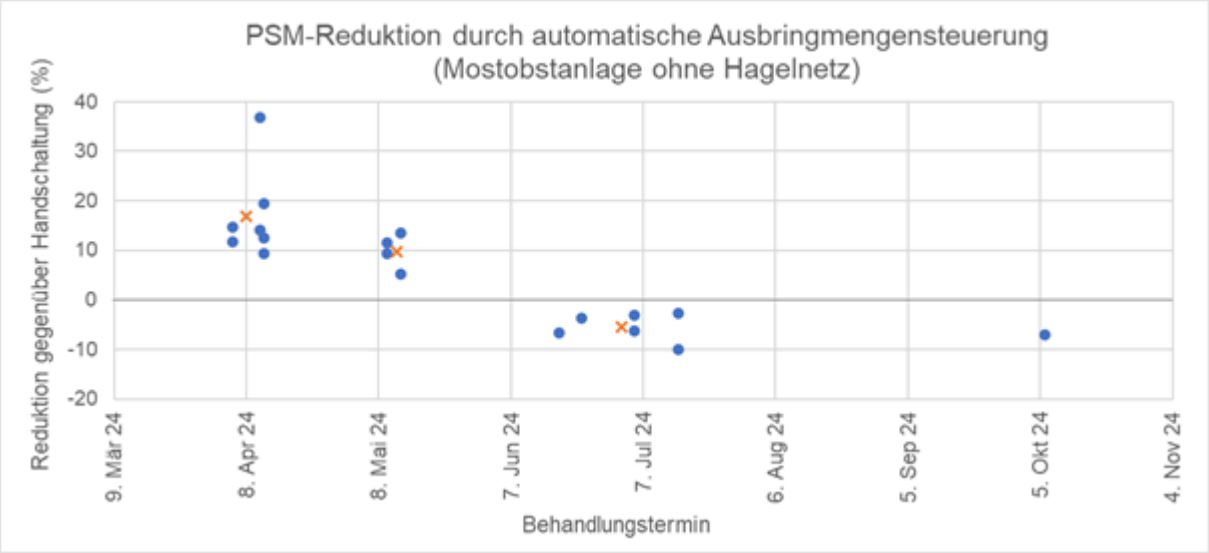


Abbildung 2: Im Jahresverlauf erzielte Einsparungen an Fungiziden und Insektiziden durch die automatische Anpassung der Applikationsmenge an das Laubwandvolumen. Daten der Saison 2024 von zwei Parzellen einer Mostobstanlage ohne Hagelschutz. Als Referenz diente die 2023 ermittelte Ausbringmenge bei manueller Schaltung der Spritzdüsen am Anfang und Ende der Reihen. Neben den Einzelwerten (Punkte) sind die Mittelwerte (Kreuze) der Behandlungen im April, Mai und Juni/Juli dargestellt.

Resultate Punktspritzung Obstbau

Durch die Beschränkung des Herbizideinsatzes auf den Stammbereich der Obstbäume wurden im Vergleich zu einer durchgehenden Bandbehandlung entlang der Reihen unabhängig vom Baumabstand durchschnittlich noch 43 % der Fläche behandelt, was einer PSM-Einsparung von 57 % entspricht. Sobald sich Hagelnetzpfähle zwischen zwei Bäumen befanden, wurde die Düse nicht abgestellt und der Bereich zwischen beiden Bäumen durchgehend gespritzt, vergleiche Abbildung 3. Die mögliche PSM-Reduktion verringerte sich dadurch auf 52 %. Über die gesamte Saison 2024 erfolgten in der Anlage vier Behandlungen mit der Punktspritze. Da das unbehandelte Gras in der Reihe mit einem Fadenmäher kurzgehalten wurde, musste mit der Punktspritze nicht öfter gefahren werden als bei Bandbehandlung.

Diskussion

Die gezielte Behandlung von Einzelpflanzen mittels **Spot-Spraying** bietet grosses Potential zur Einsparung von PSM und damit auch zur Verminderung der Risiken für Gewässerorganismen. Die Höhe der Risikoreduktion variiert dabei entsprechend der Toxizität der eingesetzten Wirkstoffe. Voraussetzung für einen zuverlässigen Einsatz der Technologie sind die korrekte Erkennung der Zielpflanzen und die exakte Steuerung der Spritzdüsen. Die Erkennungsalgorithmen haben sich im Verlauf des Projektes deutlich verbessert. Während die Unkrauterkennung beim Testeinsatz des Ecorobotix-ARA 2021 in Zuckerrüben noch ungenügend war, funktionierte das Gerät bei den Behandlungen 2024 in Zuckerrüben und Zwiebeln problemlos. Herbizidapplikationen als Spot-Spraying sind allerdings nur sinnvoll, wenn der Unkrautdruck auf der Fläche nicht zu gross ist. In den meisten Fällen wird es daher erforderlich sein, vorgängig mindestens eine Flächenbehandlung durchzuführen, um die Zahl der zu behandelnden Unkräuter und damit den PSM-Einsatz zu beschränken. Pro Spot-Behandlung sind dann jedoch Einsparungen von über 80 % möglich.

Bei der Spot-Ausbringung von Fungiziden und Insektiziden entscheidet die Kulturgrösse über das Einsparpotential. Für kleine Salatpflanzen mit 12 cm Durchmesser lag die PSM-Reduktion gegenüber einer Bandbehandlung bei 66 %, für mittlere und grosse Pflanzen (Durchmesser 16 cm bzw. 22 cm) bei 51 % bzw. 31 %. Keller et al. (2023) ermittelten mit ihrem Spot-Spraying Roboter vergleichbare Werte. Gemessen über die gesamte Kulturdauer geben sie für Salat eine Einsparung von 40 % gegenüber Bandapplikationen und 75 % gegenüber Flächenspritzungen an. Das gilt unter der Voraussetzung, dass alle Fungizid- und Insektizidbehandlungen als Spot-Spraying erfolgen. Auf den acht untersuchten PFLOPF-Parzellen wurden die Spot-Behandlungen jedoch meist mit Flächenbehandlungen kombiniert. Über die gesamte Kulturdauer lag die mittlere Reduktion daher nur bei knapp 50 % verglichen mit reinen Flächenspritzungen.

Die PSM-Einsparungen, die durch den Einsatz einer **Präzisionsspritze mit automatischer Ausbringmengenregulierung** erzielt werden konnten, waren in gedeckten Obstanlagen mit durchschnittlich <5 % eher gering. Reihenendschaltung und Pflanzenlückenerkennung funktionierten sehr gut, problematisch waren aber lange Pflanzstäbe und die Hagelnetzpfähle, die von der Spritze als Bäume angesehen und bis oben behandelt wurden. Anlagen ohne Witterungsschutz bieten ein etwas grösseres Reduktionspotential, sind jedoch untypisch für die Projektregion (Anbaugebiet rund um den Bodensee). Da die Ausbringmenge automatisch an das Laubwandvolumen angepasst wird, nimmt die mögliche Einsparung im Jahresverlauf ab. Beim Einsatz der Spritze in der ungedeckten Mostobstanlage wurde nach etwa der Hälfte der Behandlungen keine Einsparung mehr erzielt.

Hagelnetzpfähle waren auch für die **Punktspritze** ein Problem. Die Spritzdüse wird über eine Lichtschranke geöffnet, sobald diese einen Baum passiert und dann zeitgesteuert wieder geschlossen. Bei einem Pfahl zwischen zwei Bäumen löst die Lichtschranke bereits wieder aus, wenn die Düse noch geöffnet ist, daher wird der Bereich durchgehend gespritzt. Der gleiche Mechanismus liefert auch die Erklärung dafür, dass der Anteil der ungespritzten Bereiche entgegen der Erwartung bei grösserem Baumabstand nicht zugenommen hat. In der untersuchten Obstanlage waren die Bäume mit 80 cm Abstand noch recht jung und befanden sich meist direkt an den Pflanzstäben. Bei einem Abstand von 120 cm handelte es sich hingegen durchweg um ältere, oft abgeknickte Bäume mit einer Lücke zum Pflanzstab in Höhe Lichtschranke. Durch das zweimalige Auslösen blieb die Spritzdüse insgesamt länger geöffnet und der Anteil der ungespritzten Bereiche lag – wie bei geringerem Baumabstand – bei gut 50 % (Abbildung 3).

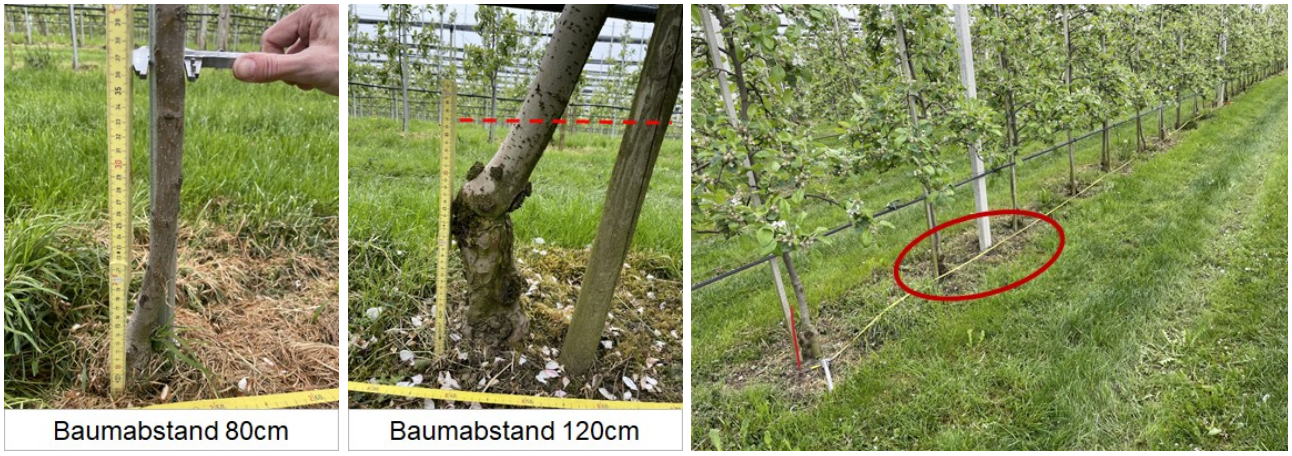


Abbildung 3: Punktspritzung von Herbizid im Stammbereich von Obstbäumen. Links: Junger Baum direkt am Pflanzstab. Mitte: Älterer Baum mit Abstand zum Pflanzstab. In Höhe der gestrichelten Linie löst die Lichtschranke zweimal aus. Die Spritzdüse bleibt dadurch insgesamt länger geöffnet. Rechts: Bei einem Hagelnetzpfahl zwischen zwei Bäumen wird der Bereich durchgehend gespritzt.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Das Spot-Spraying von Unkräutern in Kombination mit flächigen Behandlungen zur vorgängigen Reduktion des Unkrautdrucks ist im Hinblick auf Herbizideinsparungen eine sehr interessante Alternative zu reinen Flächenspritzungen. Funktionierende Technologien sind auf dem Markt vorhanden und werden auch von Lohnunternehmern angeboten.

Das Ausbringen von Fungiziden und Insektiziden zum Schutz der Kulturen ist teilweise mit denselben Geräten möglich. Bei Kombination von Spot-Spraying und Hacken ist die Fahrgeschwindigkeit stark limitierend. In späten Stadien, wenn die Pflanzen schon einen Grossteil des Bodens bedecken und nur noch relativ wenig PSM eingespart werden kann, empfiehlt sich daher der Einsatz einer normalen Feldspritze mit hoher Flächenleistung.

Die Erfahrungen mit der Inovel-Spritze im Obstbau zur automatischen Anpassung der Ausbringmenge an das Laubwandvolumen waren eher ernüchternd. Verglichen mit den Anschaffungskosten und der notwendigen Einarbeitung waren die erzielten Einsparungen relativ gering, insbesondere bei den im Projektgebiet verbreiteten Anlagen mit Hagelschutznetzen.

Die Punktspritze zur Entfernung des Unterwuchses im Stammbereich der Bäume bietet deutlich mehr Reduktionspotential. Je nach Witterung muss eventuell öfter behandelt werden als bei einer Bandapplikation, da die

Fläche schneller wieder zuwächst. Das Kurzhalten der unbehandelten Bereiche kann diesen Prozess stark verzögern, ist jedoch mit zusätzlichem Arbeitsaufwand verbunden.

4.5 Massnahme 5 – Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung im Acker- und Gemüsebau

Methodik

Die Auswertung basiert auf jährlich erhobenen Daten (2020–2024) der Unkrautbehandlungen auf den für die Massnahme angemeldeten Parzellen. Erfasst wurden jeweils alle Flächenspritzungen, Bandspritzungen und Hackdurchgänge inklusive der bei den Spritzungen verwendeten Herbizide und Aufwandmengen. Beim Hacken wurde vermerkt, ob dieses zusätzlich zur Flächenspritzung erfolgte oder sie ersetzt hat. Die Auswertung erfolgte getrennt für die verschiedenen Kulturen. Die Einsparung an PSM wurde aus dem Verhältnis zwischen Flächenspritzungen, Bandbehandlungen und reinen Hackdurchgängen ermittelt. Zusätzlich wurde für die Massnahme auch die Veränderung der potenziellen Risiken für Organismen in Oberflächengewässern betrachtet. Dem tatsächlichen Spritzplan mit dem durch das Hacken reduzierten Herbizideinsatz wurde dafür ein theoretischer Spritzplan gegenübergestellt, bei dem alle tatsächlich durchgeführten Unkrautbehandlungen als Flächenspritzungen angesehen wurden (Ausnahme: zusätzliches Hacken wurde im theoretischen Spritzplan nicht berücksichtigt). Als Eintragspfade in die Gewässer wurden Drift, Oberflächenabfluss und Drainage berücksichtigt.

Resultate PSM-Reduktion

Im **Ackerbau** liegen Daten für Zuckerrüben und Mais vor, den Hauptzielkulturen für das Hacken, siehe Abbildung 4. Einzelne Rückmeldungen gab es auch für Ackerbohnen, Kartoffeln und Raps, auf Grund der geringen Flächenanzahl werden diese Kulturen jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Die Auswertung für **Zuckerrüben** basiert auf Angaben von 9 verschiedenen Betrieben mit insgesamt 52 Zuckerrübenfeldern, die bis zu 4 x gegen Unkraut behandelt wurden. Elf dieser Felder wurden 1–2 x zusätzlich zu den Flächenspritzungen gehackt ohne Einsparung von PSM. Auf den übrigen Parzellen wurden einzelne oder alle Flächenspritzungen durch eine Kombination aus Hacken und Bandspritzung ersetzt. Da bei Bandspritzung jeweils noch 1/3 der Zuckerrübenfläche behandelt wurde, lag die maximal mögliche Reduktion bei 67 %, wenn vollständig auf Flächenspritzungen verzichtet wurde. Bei einer Kombination aus Flächenspritzungen und Bandbehandlungen lag die Einsparung zwischen 22 % und 50 %.

Für **Mais** liegen Daten von 10 Betrieben mit insgesamt 49 Feldern vor, die bis zu 3 x gegen Unkraut behandelt wurden. Nur auf zwei dieser Maisparzellen erfolgte das Hacken zusätzlich zur Flächenspritzung ohne Einsparung von PSM. Mehrheitlich wurden die Flächenspritzungen durch Hacken und Bandspritzung ersetzt, wobei die Bandbehandlung je nach Reihenabstand zwischen 60 % und 33 % der Gesamtfläche betraf. Die PSM-Reduktion lag dementsprechend zwischen 40 % und 67 %. Anders als bei Zuckerrüben, wurde bei einem Teil der Maisparzellen vollständig auf Herbizide verzichtet und ausschliesslich gehackt (100 % Einsparung an PSM).

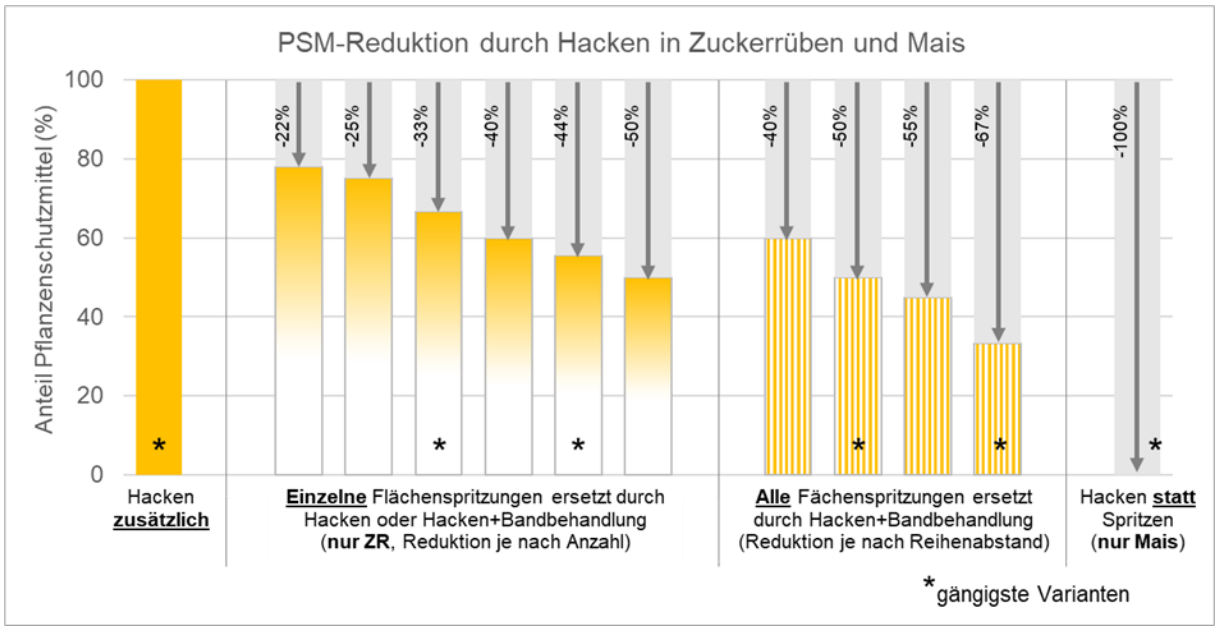


Abbildung 4: Erzielte PSM-Einsparungen durch Hacken und Bandspritzung in Zuckerrüben und Mais. Daten von 52 (Zuckerrüben) bzw. 49 Parzellen (Mais) der Jahre 2020–2024.

Im **Gemüsebau** liegen Daten für diverse Salat- und Kohlarten sowie für Sellerie und Karotten vor, siehe Abbildung 5. Lauch, Petersilie, Kürbis und Zwiebeln wurden ebenfalls gehackt, die Angaben stammen aber jeweils nur von einem Betrieb und wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die meisten Rückmeldungen gab es zum Hacken von **Salat** mit insgesamt 395 ha Anbaufläche, verteilt auf acht Betriebe. Ein Grossteil dieser Fläche (289 ha) wurde vor der Pflanzung gespritzt und nach dem Pflanzen zur Qualitätsverbesserung zusätzlich gehackt ohne Einsparung von PSM. Es gab aber auch Betriebe, die die Vorauflaufspritzung durch einen Hackdurchgang ersetzt haben (100 % Reduktion auf 76 ha). Ein Betrieb hat 2024 statt der Flächenspritzung eine Bandbehandlung durchgeführt und so 50 % PSM eingespart. Im Anschluss wurden die Flächen dann jeweils noch 1 x gehackt.

Die Auswertung für die **Kohlarten** basiert auf Angaben von 5 Betrieben mit einer Anbaufläche von insgesamt 66 ha. Auf 26 Hektaren erfolgte das Hacken zusätzlich zu den Flächenspritzungen ohne Einsparung von PSM. Auf 28 Hektaren wurden einzelne Flächenspritzungen durch Hackdurchgänge ersetzt. Die PSM-Reduktion lag je nach Anzahl zwischen 50 % und 75 %. Durch Hacken und Bandbehandlung konnte ein Betrieb 55 % PSM einsparen. Auf einem anderen Betrieb wurde der Kohl ausschliesslich gehackt (100 % Reduktion).

Für **Sellerie** liegen ebenfalls Daten von 5 Betrieben vor mit insgesamt 23 ha Anbaufläche. Knapp die Hälfte davon (10 ha) wurde zusätzlich zu den Flächenspritzungen gehackt ohne Einsparung von PSM. Bei Ersatz einzelner Spritzungen durch Hackdurchgänge (insgesamt 6 ha) war eine Reduktion von maximal 67 % möglich. Hacken und Bandbehandlung sparte 55 % PSM (5 ha). Nur auf einer Fläche wurde vollständig auf Herbizide verzichtet und das Unkraut durch zweimaliges Hacken kontrolliert (100 % Reduktion).

Das Hacken in **Karotten** wurde von 3 Betrieben umgesetzt. Einer davon hat auf 20 Hektaren als Ergänzung zu den Flächenspritzungen 1 x zusätzlich gehackt ohne Einsparung von PSM. Die anderen beiden Betriebe haben eine von zwei Flächenbehandlungen durch Hacken ersetzt und so 50 % PSM eingespart. Der Flächenumfang war mit insgesamt 6ha allerdings deutlich geringer.

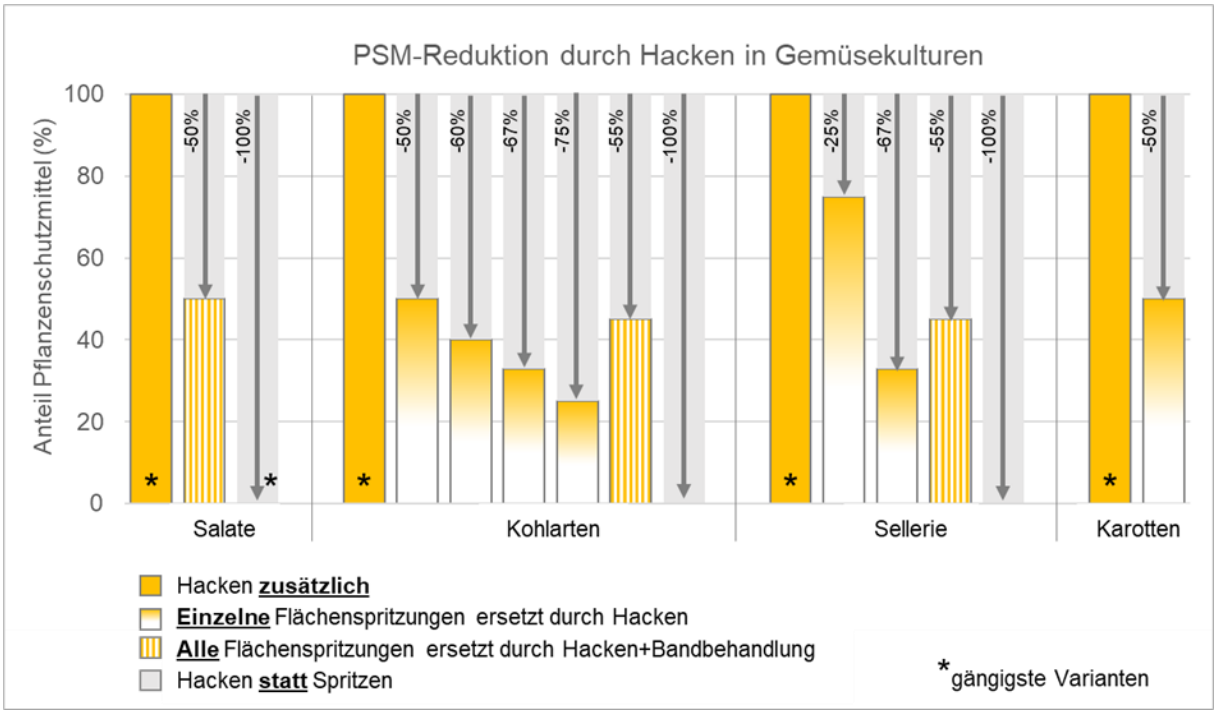


Abbildung 5: Erzielte PSM-Einsparungen durch Hacken in Gemüsekulturen. Daten von PFLOPF-Betrieben aus den Jahren 2020–2024.

Resultate Risikoreduktion

Durch Hacken und Bandspritzung anstelle von Flächenbehandlungen konnten bei Zuckerrüben pro Jahr durchschnittlich 40 % der Herbizidwirkstoffmengen eingespart werden. Im Mais war die durchschnittliche Reduktion mit 75 % deutlich höher, da teilweise ausschliesslich gehackt und somit vollständig auf Herbizide verzichtet wurde. Durch den verringerten Herbizideinsatz reduzierte sich das akute Risiko für Organismen in Oberflächengewässern infolge Wirkstoffeintrag aus Drift, Oberflächenabfluss und Drainage um durchschnittlich 53 % bei Zuckerrüben und 86 % bei Mais. Für die Gemüsekulturen wurde eine Wirkstoffreduktion von durchschnittlich 86 % (Salate), 62 % (Kohlarten) und 55 % (anderes Gemüse: Sellerie, Karotten, Lauch, Kürbis) ermittelt. Daraus resultierte eine Risikoreduktion von 87 % (Salate), 74 % (Kohlarten) und 55 % (anderes Gemüse).

Diskussion

Die **Ackerbaubetriebe** im PFLOPF nutzen Hackgeräte überwiegend für die Unkrautkontrolle in Zuckerrüben und Mais. In anderen Reihenkulturen wie Kartoffeln oder Sonnenblumen kommt die Technik deutlich seltener zum Einsatz. Das Hacken erfolgt fast ausschliesslich zwischen den Reihen, entweder mit einem GPS-gelenkten Traktor oder mit einer Kamerahacke. Zur Unkrautregulierung in der Reihe wird das Hacken häufig mit einer Bandspritzung kombiniert. Je nach Reihenabstand sind dadurch bis zu $^2/_3$ weniger PSM möglich. Im Mais lassen sich die Unkräuter in der Reihe auch sehr gut kontrollieren, indem sie mit Erde verschüttet werden, beispielsweise durch die zusätzliche Montage von Fingerzinken. So kann ganz auf Herbizide verzichtet werden. Das gesetzte Ziel von 70 % PSM-Reduktion ist in Zuckerrüben und Mais also durchaus erreichbar. Allerdings ist die Durchführung der Massnahme witterungsabhängig, denn der Boden sollte für das Hacken gut abgetrocknet sein. Bei anhaltend nass-kalten Bedingungen wie im Frühjahr 2021 werden die Grenzen der Technologie schnell sichtbar: Die Einstellung der Hacke ist wegen der feuchten Böden aufwändiger, die Befahrung hinterlässt deutliche Spuren und der Bekämpfungserfolg fällt wesentlich geringer aus. Viele Betriebe verzichten dann auf das Hacken und Greifen auf Herbizide zurück. Das gilt nicht nur für den Ackerbau, sondern auch für **Gemüsebetriebe**. Hier ist die Variation der Hackkulturen deutlich grösser, am weitesten verbreitet ist bei den PFLOPF-Betrieben jedoch das Hacken von Salatbeeten. Zum Einsatz

kommen in der Regel kameragesteuerte Hackgeräte, die das Unkraut auch innerhalb der Reihe regulieren. Durch die gleichmässige Verteilung insbesondere der gepflanzten Kulturen funktioniert das problemlos. Das Hacken in der Reihe ist für Gemüsebetriebe sehr interessant, weil die Unkräuter hier nur durch Handjäten oder Herbizide kontrolliert werden können. Ein Verschütten durch seitliches Anhäufeln ist nicht möglich, da die Gefahr der Verschmutzung und Übertragung von Krankheitserregern besteht. Durch das Hacken auch innerhalb der Pflanzenreihen könnte im Gemüsebau theoretisch komplett auf Herbizide verzichtet werden. In der Praxis erfolgt das Hacken aber häufig zusätzlich, da die bewilligten Spritzungen nach Aussage der Landwirte oft nicht ausreichen, um das Unkraut zu kontrollieren.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Das Hacken in Acker- und Gemüsekulturen ermöglicht umfangreiche Einsparungen an Herbiziden im Bereich des angestrebten Ziels von 70 %. Die akuten Risiken für Organismen in Oberflächengewässern, insbesondere Algen, Cyanobakterien und höhere Pflanzen, können dadurch erheblich verringert werden. Die Massnahme ist jedoch witterungsabhängig und wegen des erhöhten Arbeitsaufwandes in der Praxis weniger verbreitet als beispielsweise der Einsatz von Lenksystemen. Durch den Wegfall zahlreicher Mittel gewinnt das Hacken als alternative Massnahme insbesondere im Gemüsebau an Bedeutung. Viele Betriebe beklagen jedoch den erhöhten Arbeitsaufwand, weil beispielsweise oft mehrere Hackdurchgänge erforderlich sind, um eine Herbizidbehandlung zu ersetzen oder Folienkulturen für das Hacken mehrfach abgedeckt werden müssen. Die Kosten dafür trägt meist der Betrieb, da höhere Produktpreise bei den Grossverteilern nur schwer zu realisieren sind. Die Kosten variieren stark nach Kulturen und eingesetzten Technologien. Details siehe Kapitel 6.10.

4.6 Massnahme 6 – Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obst- und Rebbau

Methodik

Bis 2021 stand für diese Massnahme keine adäquate Technologie zur Verfügung. 2022 wurde dann auf dem Obstbau-Versuchsbetrieb Güttingen der Mulchroboter Scarabaeus vom Schweizer Unternehmen Brüggli Industries in einer Apfelanlage mit alten Bäumen und relativ wenig Unterwuchs getestet. Ein Drittel einer 1,5 ha grossen Parzelle wurde bis an die Bäume heran mit dem Roboter gemäht, auf den anderen beiden 0,5 ha grossen Teilflächen wurde der Scarabaeus nur in der Fahrgasse eingesetzt und der Bewuchs im Baumstreifen mit Herbizid bzw. mit einem Fadenmäher kontrolliert.

Resultate

Über die ganze Saison waren in der Variante Herbizid zwei Glyphosatbehandlungen notwendig, die mit dem Fadenmäher und mit dem Mulchroboter eingespart werden konnten. Mit dem Fadenmäher musste der Baumstreifen 3 x behandelt werden, um ihn ausreichend kurz zu halten. Der Mulchroboter war in der Regel von 8–12 Uhr im Einsatz und mähte bis dicht an die Bäume heran, so dass nicht von Hand oder mit anderen stockräumenden Maschinen unterstützt werden musste. Allerdings bereiteten dem Gerät herumliegende Äste Probleme und nasses Gras verstopfte immer wieder die Mähtrommeln. Die Zahl der Fehlermeldungen war hoch und der technische Support vom Hersteller dementsprechend intensiv. Mit der Bearbeitung der 1,5 ha war der Roboter ausserdem ziemlich am Anschlag und weit unter der im Prospekt angegebenen Flächenleistung von 8 ha. Der Testeinsatz sollte 2023 auf dem Versuchsbetrieb fortgeführt werden, wurde letztendlich aber abgebrochen, da das Gerät auf Grund der zahlreichen Störungen nie selbständig gelaufen ist.

Diskussion

Der Mulchroboter Scarabaeus wurde speziell für den Einsatz in schwierigem Gelände entwickelt, wie wir es in Obst- und Rebanlagen antreffen. Er sollte dort dementsprechend zuverlässiger arbeiten als herkömmliche für Rasen-Grünflächen konzipierte Robotermäher. Bei diesen führten kleinere Unebenheiten, zu hohes Gras, Äste und Fallobst immer wieder zu Störungen und verhinderten einen reibungslosen Einsatz (Boos et al., 2023). Geländeunebenheiten und herumliegende Äpfel waren für den Scarabaeus meistens kein Problem, Astmaterial überforderte den Roboter aber häufig und auch das Mähen von nassem Gras verlief nicht reibungslos. Zudem war die tatsächliche Flächenleistung deutlich geringer als angegeben, was grösstenteils aus der limitierten Energieversorgung der PV-

Ladestation resultierte, die einen Einsatz auch auf Parzellen abseits des Stromnetzes ermöglichen soll. Eine ausreichende Dimensionierung der Solarzellenfläche könnte das Problem entschärfen. Da der Testeinsatz 2022 intensiv von der Herstellerfirma begleitet wurde, könnten die aufgetretenen Schwierigkeiten zumindest teilweise überwunden sein. Wenn der Scarabaeus läuft, fährt er die Anlage auf Basis präziser Satellitennavigation systematisch ab und ist dadurch effizienter als herkömmliche Robotermäher, die beim Anstossen an ein Hindernis immer wieder wenden, was die Mähleistung insbesondere bei geringem Baumabstand verringert (Boos et al., 2023). Das Gerät kommt nah an die Bäume heran, so dass es in der einjährigen Testphase des Mulchroboters nicht zu einer Horstbildung um die Stämme kam. Diese ist allerdings bei solchen Geräten in der Regel aufbauend und müsste daher über mehrere Jahre beobachtet werden.

Schlussfolgerungen und offene Fragen

Durch das Mulchen von Obst- und Rebanlagen kann der Einsatz an Herbiziden stark reduziert oder völlig vermieden werden. Die Arbeit bindet jedoch viele Ressourcen, weshalb die Nutzung eines autonom arbeitenden Mähroboters sehr zu empfehlen wäre. Der seit ein paar Jahren am Markt verfügbare Mulchroboter Scarabaeus des Schweizer Unternehmens Brüggli Industries brachte im Testeinsatz 2022 noch nicht zuverlässig die versprochene Leistung. Sollte das Gerät inzwischen ausgereift sein, könnte es die herbizidfreie Beikrautregulierung deutlich effizienter und damit attraktiver machen. Die Technologieentwicklung am Markt sollte auf jeden Fall weiterverfolgt werden, da zuverlässig arbeitende Mähroboter eine wirkliche Alternative zu den herkömmlichen Pflegesystemen darstellen würden.

4.7 Massnahme 7 – Drohneneinsatz zur Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster und Abdriftreduktion im Reb- und Obstbau

Vorbemerkung

Im Projektantrag ist das Ziel einer 30 % PSM-Reduktion im Vergleich zur Helikopterapplikation (Reben) bzw. herkömmlichen Applikation (Hochstamm-Obstbau) formuliert. Der Einsatz von Pflanzenschutzdrohnen war zum Zeitpunkt der Erstellung des Projektantrags im Laufe des Jahres 2018 vor allem im Steillagen-Weinbau im Wallis durchgeführt und untersucht worden. Es lagen wenige Erfahrungen zum Einsparpotenzial vor und die anvisierten 30 % Reduktion aufgrund einer Behandlung zum optimierten Zeitpunkt und mit reduzierter Abdrift erschienen realistisch. Nach ersten Einsatzerfahrungen in PFLOPF stellte sich die Situation anders dar. Einsparungen von PSM durch die Drohne sind nicht zu erwarten, da bei der Behandlung vergleichbare Wirkstoffmengen appliziert werden wie mit einer herkömmlichen Spritze. Der Einsatz der Drohne unabhängig von der Bodenfeuchte erlaubt zwar eine im Hinblick auf die Wirksamkeit optimal terminierte Ausbringung, die Zahl der Applikationen reduziert sich dadurch aber nicht. Im Gegenteil: Die flächige Ausbringung von oben in eine Raumkultur (oberste Blattetage von oben gut benetzt, nach unten und unter den Blättern stark abnehmende bis geringe Benetzung) erfordert im Vergleich zur Gebläsespritze mit seitlichem PSM-Eintrag in die verschiedenen Blattetagen teilweise zusätzliche Behandlungen.

Methodik

Für diese Massnahme erfolgten keine quantitativen Auswertungen. Das Monitoring beschränkte sich auf eine Wirkungsbonitur am Strickhof Wülflingen. In den Jahren 2019–2021 wurden dort Reben der Sorte Blauburgunder auf zwei Teilflächen mittels Drohne und mit einem herkömmlichen Sprühgerät (Fischer Turbomobil) gegen Falschen und Echten Mehltau behandelt. Eine unbehandelte Teilfläche diente als Kontrolle. Nach der Blüte und vor der Ernte wurde an Blättern und Trauben jeweils der prozentuale Krankheitsbefall erfasst.

2024 erfolgten zusätzlich Belagsmessungen mit wassersensitivem Papier nach Wasserapplikation mit einer Drohne quer zu den Reihen. Erfasst wurde die Benetzung an 18 Rebstöcken direkt unterhalb und zwischen den Flugbahnen der Drohne. Die Messungen erfolgten zu Beginn der Blüte und bei maximal entwickelter Laubwand, jeweils an der Triebspitze und in der Traubenzone, bei voller Laubwand zusätzlich in der mittleren Zone der Reben.

Resultate Krankheitsbefall

Echter Mehltau stellte in allen drei Jahren keine grösseren Probleme dar. Ein nennenswerter Befall trat nur bei den Erhebungen vor der Ernte 2020 auf, vor allem an den Blättern der unbehandelten Kontrolle, weniger bei den behandelten Verfahren, wobei die Unterschiede zwischen Drohne und Spritze gering waren. Beim *Falschen Mehltau*

gab es markante Unterschiede zwischen den drei Jahren und den Verfahren. **2019** war in der unbehandelten Kontrolle bereits nach der Blüte an rund einem Drittel der Blätter und einem Viertel der Trauben Falscher Mehltau zu finden. Bei der Drohnenvariante gab es an 15 % der Blätter und 2 % der Trauben schwache Symptome und die mit dem Turbomobil behandelten Stöcke wurden gar nicht durch Falschen Mehltau befallen. **2020** waren bei Drohne und Sprühgerät vor der Ernte im Mittel rund 10–20 % der Blattfläche befallen, ohne Behandlung etwa 60 %. In dem sehr nassen Jahr **2021** mit allgemein hohem Krankheitsdruck zeigten sich die Grenzen der Drohnenbehandlung. Der Befall an Blättern und Trauben war in diesem Verfahren zwar viel geringer als in der unbehandelten Kontrolle (45 % vs. 75 %), aber doch deutlich höher als beim herkömmlichen Sprühgerät (25 %).

Resultate Belagsmessung

Abbildung 6 zeigt, dass bei der ersten **Behandlung zu Beginn der Blüte** die Oberseite der Blätter und Gescheine (=Blütenstände) an Rebstöcken direkt unterhalb der Flugbahn der Drohne generell besser benetzt war als an Rebstöcken, die sich zwischen zwei Flugbahnen befanden. Direkt unter der Drohne wiesen Blätter an der Triebspitze auf der Oberseite zwischen 6 % und 33 % benetzte Fläche auf, zwischen den Flugbahnen betrug die Benetzung 1,5 % bis 14 %, wobei 7 der 18 Messungen unter dem Wert von 5 % lagen, der von Knewitz (2015) als Mass für eine ausreichende Benetzung angegeben wird. Im Bereich der Traubenzone vergrösserte sich der Anteil an Blättern, die auf der Oberseite unzureichend benetzt wurden (12 von 18 unter der Flugbahn, 14 von 18 zwischen den Bahnen). Auch bei den Gescheinen war die Benetzung der Oberseite vielfach nicht ausreichend (8 von 18 unter der Flugbahn, 15 von 18 zwischen den Bahnen). Die Unterseite von Blättern und Gescheinen wies mit einer Ausnahme immer weniger als 5 % Benetzung auf, selbst an der Triebspitze. Bei **voll entwickelter Laubwand** wurde die Oberseite von Blättern und Trauben schlechter benetzt als bei der ersten Behandlung zu Beginn der Blüte. Das betraf insbesondere die Blätter an der Triebspitze, weshalb dieser Bereich diesmal keine bessere Benetzung als die anderen beiden Zonen aufwies. Unabhängig von der Lage der Rebe unterhalb oder zwischen den Flugbahnen waren nur drei bis maximal fünf der 18 Blätter oder Trauben auf der Oberseite ausreichend benetzt. Auf der Unterseite gab es zwischen den Flugbahnen immer weniger als 5 % Benetzung, direkt unter der Drohne in Einzelfällen auch mehr.

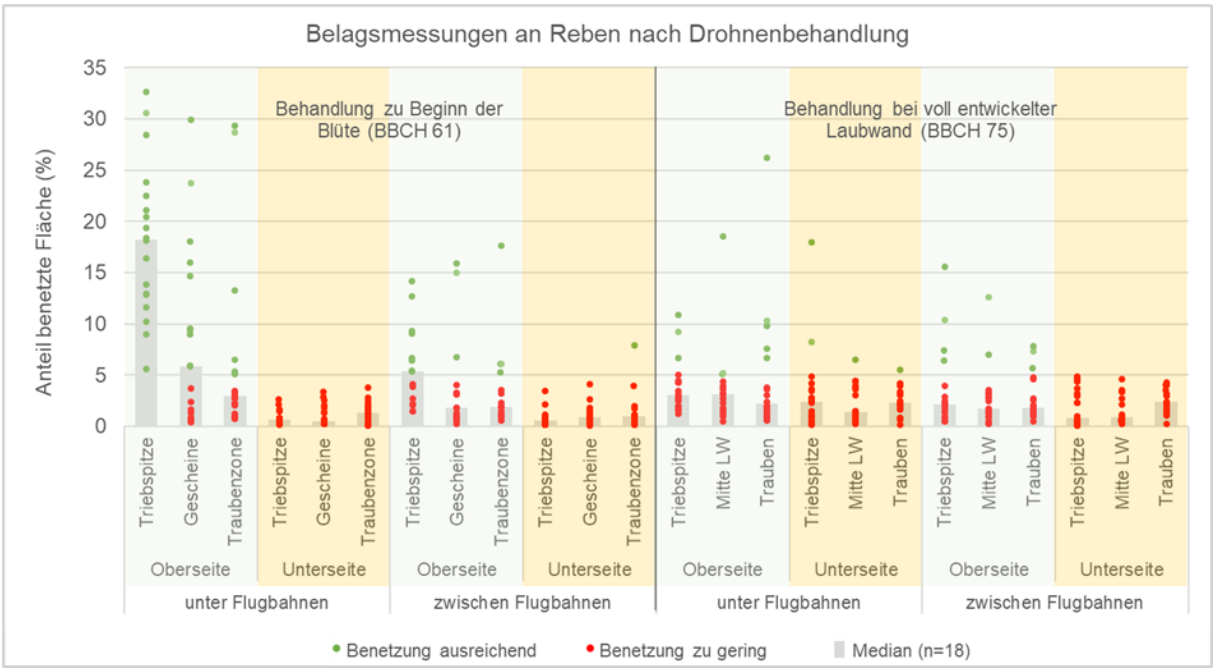


Abbildung 6: Belagsmessungen an Reben mit wassersensitivem Papier nach zwei Drohnenbehandlungen quer zu den Reihen. Der Anteil der benetzten Fläche wurde an je 9 Rebstöcken direkt unterhalb und zwischen den Flugbahnen der Drohne bestimmt. Messungen jeweils an der Triebspitze (2 Blätter) und in der Traubenzone (Blüte: 2 Blätter+2 Gescheine; volle LW: 2 Trauben), bei voll entwickelter Laubwand (LW) zusätzlich in der mittleren Zone der Reben (2 Blätter).

Diskussion

Es ist bekannt und hat sich auch bei den hier durchgeführten Belagsmessungen gezeigt, dass bei Drohnenapplikation (genau wie bei Helikopterapplikation) eine schlechtere Benetzung der Blattunterseite und der

Trauben erfolgt, die mit zunehmender Laubwandentwicklung immer stärker zum Tragen kommt. Die Anlagerung auf der Oberseite ist vielfach ausreichend, weshalb Echter Mehltau während der dreijährigen Wirkungsbonitur zum Krankheitsbefall keine grösseren Probleme darstellte, da sich der Pilz hauptsächlich auf der Blattoberseite entwickelt, und zwar bei warmen Bedingungen mit Temperaturen von 23–30°C. Dementsprechend war auch die nasse Saison 2021 in Bezug auf Echten Mehltau nicht problematisch. Anders beim Falschen Mehltau: Dieser entwickelt sich auf der Unterseite der Blätter und findet ideale Bedingungen bei 15–20°C und feuchter Witterung. Der Krankheitsdruck war daher 2021 sehr hoch und die Behandlung mit der Drohne konnte die Reben nicht ausreichend schützen. Die Applikation mit einem herkömmlichen Sprühgerät von unten nach oben war unter diesen Bedingungen deutlich wirksamer. Einen Einfluss auf die Anlagerungsqualität bei der Verwendung von Sprühdrohnen hat auch der Abstand der Flugbahnen, der die effektive Arbeitsbreite bestimmt. Messungen auf dem Drohnenprüfstand in Tänikon haben gezeigt, dass das Sprühbild von Drohnen einer Glockenkurve ähnelt, wenn ohne Überlappung geflogen wird. Um ein ausgeglichenes Sprühbild mit einer möglichst gleichmässigen Verteilung zu erreichen, sollte der Abstand zwischen den Flugbahnen daher nicht zu gross gewählt werden. Für die DJI T16, die bei den Belagsmessungen verwendet wurde, wäre ein Abstand von 3 m ideal. Geflogen wurde jedoch praxisüblich mit 4,50 m, was erklärt, dass Reben zwischen den Flugbahnen generell weniger benetzt wurden als solche direkt darunter.

Die Flexibilität bei der Wahl des Einsatzzeitpunktes (Behandlung zum optimalen Zeitpunkt) ist bei Drohnenapplikation verglichen mit einer Helikopterapplikation höher. Mit einer Gebläsespritze im Nicht-Steillagen-Weinbau kann der Einsatzzeitpunkt allerdings ähnlich flexibel gewählt werden wie mit einer Drohne – sofern der Bodenzustand eine Befahrung mit der Spritze zulässt. Unabhängig vom Verfahren geht ein überbetrieblicher Technologieeinsatz in der Regel mit einer verminderten Flexibilität bei der Wahl des optimalen Einsatzzeitpunktes einher.

Schlussfolgerung und offene Fragen

Einsparungen von PSM sind durch die Drohne nicht zu erwarten und die Wirksamkeit ist weniger gut als bei der Bodenapplikation, da nur von oben nach unten behandelt wird. In besonders kritischen Phasen oder schwierigen Jahren mit anhaltender Nässe ist daher sicher die Unterstützung durch herkömmliche Sprühgeräte sinnvoll. Ansonsten hat sich aber gezeigt, dass bei richtigem Einsatz und richtiger Mittelwahl, je nach Krankheitsdruck und Sortenanfälligkeit, gute Ergebnisse mit der Drohne erzielt werden können. Da Drohnen im Gegensatz zu herkömmlichen Sprühgeräten unabhängig von der Bodenfeuchte einsetzbar sind, können auch kurze Behandlungsfenster für die Ausbringung genutzt werden. Messungen von Agroscope (Dubuis et al., 2023) bestätigen ausserdem, dass Drohnen geringere Windgeschwindigkeiten und damit auch weniger Abdrift als Helikopter und Gebläsespritzen erzeugen. Die wesentlichen Vorteile der Drohne sind eine hohe Schlagkraft und ein besserer Schutz des Anwenders oder von Dritten. Den grössten Nutzen hat der Drohneneinsatz in sehr steilen Lagen, in denen mit herkömmlichen Sprühgeräten nicht mehr gefahren werden kann.

5 Anhang 2: Ökologie – Risikoreduktion

5.1 Einleitung

Das Ressourcenprojekt PFLOPF hat sich zum Ziel gesetzt, den Pflanzenschutzmittel (PSM)-Einsatz mit verschiedenen technologiebasierten Massnahmen um mindestens 25 % zu reduzieren. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Projektes wurden für die Dosierung nach Laubwandvolumen im Rebbau (Massnahme 1) sowie für das Spot-Spraying (Massnahme 4) und das sensorgesteuerte Hacken (Massnahme 5) im Acker- und Gemüsebau aus den Feldkalenderdaten und den jeweiligen Referenzfeldkalendern die PSM-Kennzahlen **Anzahl Interventionen** und **applizierte Wirkstoffmenge** errechnet. Zudem wurden potenzielle akute **Risiken für Organismen in Oberflächengewässern** (via Drift, Oberflächenabfluss und Drainage) berechnet, um die Auswirkungen der getroffenen Massnahmen zu überprüfen.

5.2 Methoden

Die Kennzahl **Anzahl Interventionen** wurde jeweils pro Wirkungsbereich (F, I, H) und Applikation auf der totalen Parzellenfläche berechnet. Mehrere in einer Tankmischung ausgebrachte Wirkstoffe desselben Wirkbereichs wurden somit als eine Intervention und eine Applikation auf der halben Fläche (z. B. Bandspritzung auf 50 % der Fläche) als halbe Intervention gezählt.

Die Kennzahl **applizierte Wirkstoffmenge** summiert die in einer Saison ausgebrachten Wirkstoffaufwandmengen pro Parzelle.

Potenzielle akute Risiken für Organismen in Oberflächengewässern wurden über Wirkstoffeinträge ins Gewässer (via Drift, Oberflächenabfluss und Drainage) und deren Verhältnis zu Toxizitätsendpunkten von Gewässerorganismen berechnet. Dazu wurden in einem ersten Schritt aus den Feldkalendern je Wirkstoffapplikation prognostizierte Wirkstoffkonzentrationen (sogenannte Predicted Environmental Concentrations (PECs)) im Oberflächengewässer mithilfe von Funktionen im R-Package pfm (Ranke, 2024) berechnet.

Die Berechnung der PEC aus **Drift**-Einträgen erfolgte analog zur Schweizer PSM-Zulassung mit Driftwerten von Rautmann et al. (2001) und einem Standardgewässer von 100 cm Breite und 30 cm Tiefe. Für die Berechnung verwendet wurde die pfm-Funktion *PEC_sw_drift()* mit einem Driftabstand von 6 m (minimaler Gewässerabstand für ÖLN-Betriebe), wenn keine Driftauflagen für das jeweilige Produkt bestanden oder mit dem Mindestabstand gemäss PSM-Zulassung (20, 50 oder 100 m). Für die Reben-Parzellen wurden je nach Anwendungszeitpunkt die Driftwerte für “vines, early” bzw. “vines, late” verwendet. Für die übrigen Parzellen wurden die Driftwerte für Ackerkulturen („arable“) verwendet. Für Herbizid-**Bandspritzungen** und **Spot-Behandlungen** wurde mit den Aufwandmengen der behandelten Flächen gerechnet und die berechneten PECs nach den Weisungen der Zulassungsstelle (BLV, 2024) um 75 % (Spot-Behandlungen ohne Abschirmung; M4 Spot-Spraying H), 82,5 % (Bandbehandlungen; M5 Hacken) und 95 % (Spot-Behandlungen mit Abschirmung; M4 Spot-Spraying F & I) reduziert.

Analog zur Schweizer PSM-Zulassung und dem Modell *Exposit 3.02* (Umweltbundesamt, 2017) erfolgte die Berechnung der PEC aus dem **Oberflächenabfluss** mit der pfm-Funktion *PEC_sw_exposit_runoff()*. Für die Berechnungen wurden die wirkstoffspezifischen Adsorptionskoeffizienten (Koc) und Abbauraten im Boden (DT50Boden) berücksichtigt (siehe Kapitel 5.5.1).

Zudem wurde mit 50 % Interzeption und einem Regenereignis 3 Tage nach jeder Applikation gerechnet. Wenn in der PSM-Zulassung Abschwemmungsauflagen bestanden, so wurden die PECs entsprechend dem Vorgehen bei der Wirkstoffzulassung reduziert.

Für die PEC-Berechnung aus **Drainage** wurde die pfm-Funktion *PEC_sw_drainage_UK()* verwendet, welche dem im Vereinigten Königreich (UK) verwendeten Drainagemodell *Drainage PEC Version 1.0* (Health and Safety Executive, 2015) entspricht. Dieses Modell simuliert eine Drainageperiode, welche am 1. Oktober beginnt. Für alle Wirkstoffe, welche davor appliziert wurden, wird der Abbau im Boden bis zum Drainageereignis berücksichtigt. Für die Berechnungen wurde durchgängig eine Interzeption von 50 % angenommen. Diese Methode wurde anstelle der

in Deutschland und der Schweiz verwendeten Methode eingesetzt, da sie stärker zwischen Wirkstoffen mit unterschiedlich starker Bodenadsorption unterscheidet.

Für die Berechnungen der **potenziellen Risiken** (oder ETR; Exposure Toxicity Ratio) wurden die PECs jeweils durch die niedrigsten akuten Toxizitätsendpunkte für Süsswasserarten in den Organismengruppen **Primärproduzenten**, **Invertebraten** und **Fische** dividiert (siehe Kapitel 5.5.2). Die PECs aus Oberflächenabschwemmung wurden sowohl als gelöste (*PEC dissolved*) als auch als totale Wirkstoffkonzentrationen (*PEC total*) berechnet. Für die potenziellen Risikoberechnungen wurden für aquatische Invertebraten und Fische jeweils die gelösten und für aquatische Primärproduzenten die totalen Wirkstoffkonzentrationen verwendet. Die einzige Ausnahme bildeten Kupferverbindungen, für die nur totale Wirkstoffkonzentrationen berücksichtigt wurden. Entsprechend wurden für die Risikoberechnungen für kupferbasierte Wirkstoffe auch nur Endpunkte verwendet, die für die totale Wirkstofffraktion galten. Die Gesamtrisiken je Parzelle wurden schliesslich aus der Summe der potenziellen akuten Risiken der drei Eintragspfade und der drei Organismengruppen über die gesamte PSM-Spritzfolge gebildet. Für die Berechnungen der potenziellen Risiken wurden sämtliche applizierte PSM-Wirkstoffe berücksichtigt, für die die Endpunkte, KOC und DT50Boden vorhanden waren.

Auf Berechnungen von Risikopotentialen mit dem Modell **SYNOPS**, wie zu Projektbeginn angedacht, wurde aus verschiedenen Gründen verzichtet. Die wichtigsten Gründe waren dabei Unstimmigkeiten in den Berechnungsformeln für die Berechnung von Oberflächenabfluss und Drainage sowie eine starke, fachlich nicht nachvollziehbare Abhängigkeit der PEC vom Applikationsdatum, insbesondere in Bezug auf den Oberflächenabfluss. Wie oben beschrieben, wurden die Berechnungen stattdessen mit einfacheren Modellen durchgeführt. Die aktuellen Berechnungsmethoden berücksichtigen nur die Eintragspfade Drift, Oberflächenabfluss und Drainage und gelten nur für das Potenzial, akute Risiken zu verursachen unter Beachtung der gültigen Abstandsauflagen der eingesetzten Produkte. Die genauen Anwendungszeitpunkte und die Tatsache, dass verschiedene Parzellen unterschiedliche Abstände zu dem nächsten Oberflächengewässer haben, werden in dem hier verwendeten Verfahren nicht berücksichtigt. Änderungen von z. B. Drift- oder Abschwemmungsauflagen oder Aktualisierungen von Toxizitätsendpunkten, wirkstoffspezifischen Adsorptionskoeffizienten (Koc) oder Abbauraten (ausgedrückt als DT50) im Boden können künftige Resultate beeinflussen.

5.3 Resultate

5.3.1 Angepasste Dosierung (M 1)

Optimierung von Fungizid-Aufwandmengen im Weinbau mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» von Agrometeo (Agroscope)

Im Rahmen der Massnahme 1 im Rebbau wurden Fungizid-Applikationen und deren Aufwandmengen auf Rebenkulturen festgehalten (*Spritzplan*). Diese Daten waren für 2 Parzellen im Jahr 2020 und je 4 Parzellen in den Jahren 2021 und 2022 vorhanden. Mithilfe des Modells «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» von Agrometeo[1] wurden optimierte Spritzmittelaufwandmengen berechnet (*Modell*). Diese beiden Feldkalender werden nachfolgend verglichen. Es gilt zu beachten, dass die Variante *Modell* nicht im Feld getestet wurde.

[1] https://www.agrometeo.ch/de/weinbau/angepasste-dosierung

Anzahl Interventionen

Zwischen 2020 und 2022 fanden auf den Rebenparzellen 5 bis 11 und durchschnittlich 8 Fungizid Interventionen statt. Abbildung 7 zeigt keine Unterschiede, da sich die Massnahme nur auf die Aufwandmenge und nicht auf die Anzahl Interventionen auswirkt.

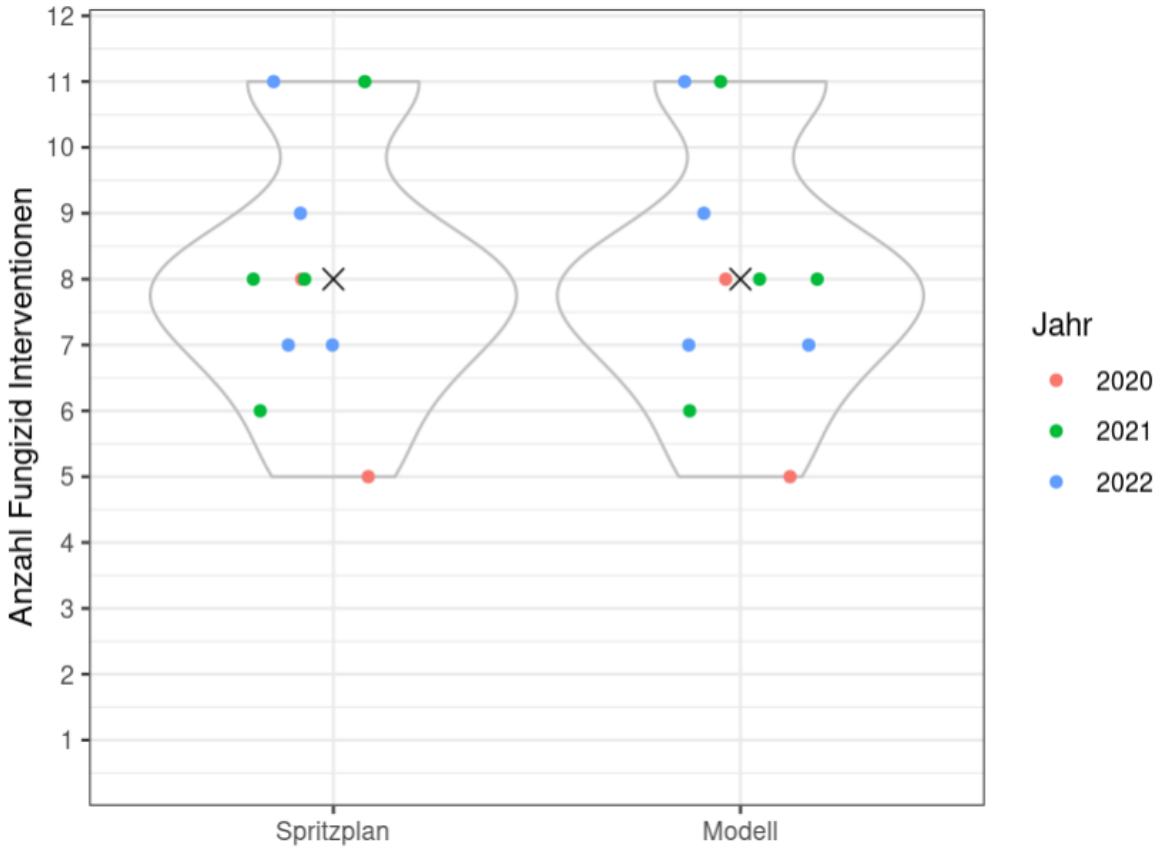


Abbildung 7: Anzahl Fungizid-Interventionen (2020–2022) je Rebenparzelle im PFLOPF Projekt. Links für die effektiven Fungizid-Applikationen (Spritzplan). Rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). X = Mittelwert.

Applizierte Wirkstoffmenge

Die applizierte Wirkstoffmenge pro Hektare lag durchschnittlich (2020–2022) bei 17 kg (*Spritzplan*). Die mit dem *Modell* berechneten optimierten Spritzmittelmengen fielen mit durchschnittlich 10 kg/ha rund 44 % niedriger aus (Abbildung 8).

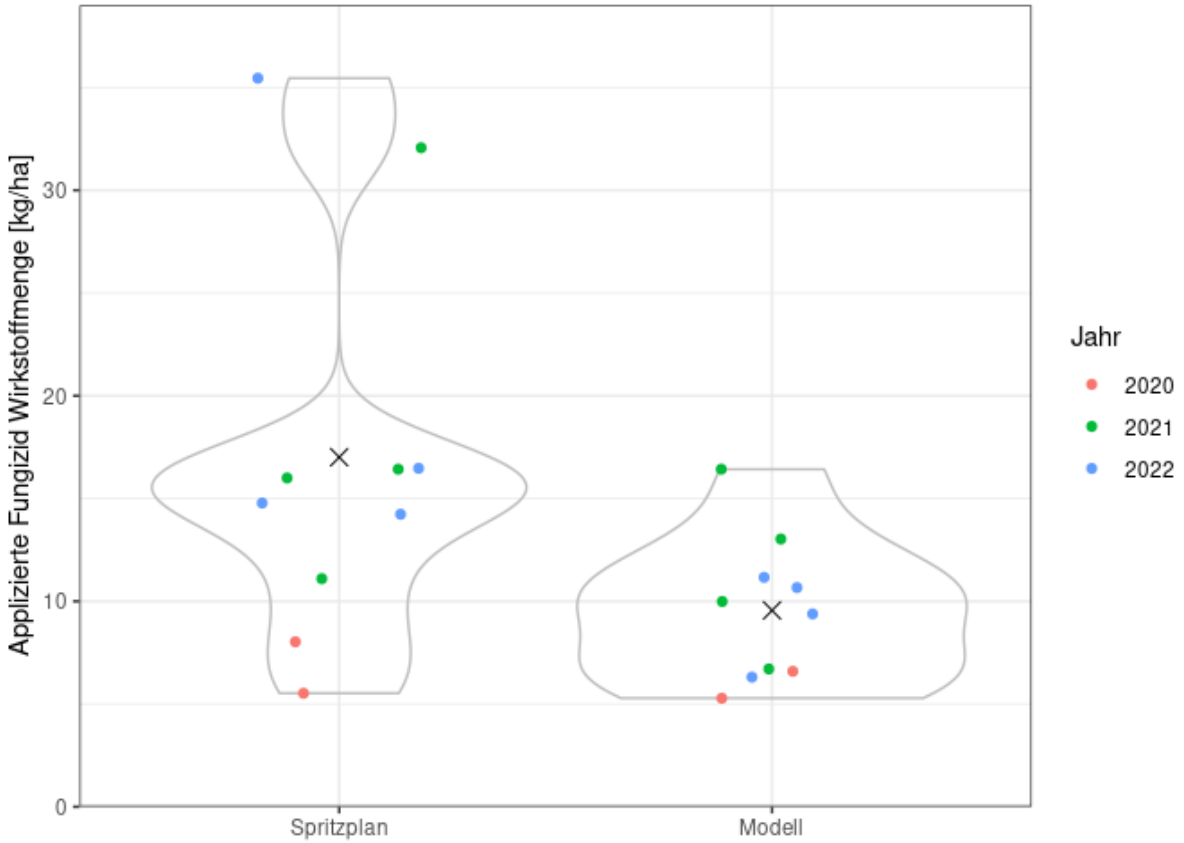


Abbildung 8: Applizierte Fungizid-Wirkstoffmenge in kg/ha (2020–2022) je Rebenparzelle im PFLOPF Projekt. Links für die effektiven Fungizid-Applikationen (Spritzplan). Rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). X = Mittelwert

Risikopotentiale

Für die optimierten Reben-Spritzpläne (*Modell*) wurde total (2020-22, alle Eintragspfade und Organismengruppen) eine durchschnittliche Reduktion der akuten potenziellen Risiken für aquatische Organismen von 33 % berechnet verglichen mit den tatsächlichen *Spritzplänen* (Abbildung 9).

Die Berechnungen zeigen für das Jahr 2020 eine deutlich kleinere Risikoreduktion (3 %). 2020 lagen die tatsächlich applizierten Wirkstoffmengen allerdings auch viel näher an den mit dem Modell berechneten Mengen als in den zwei darauffolgenden Jahren. In den Jahren 2021 und 2022 betrug die durchschnittliche Risikoreduktion 36 % und 34 %.

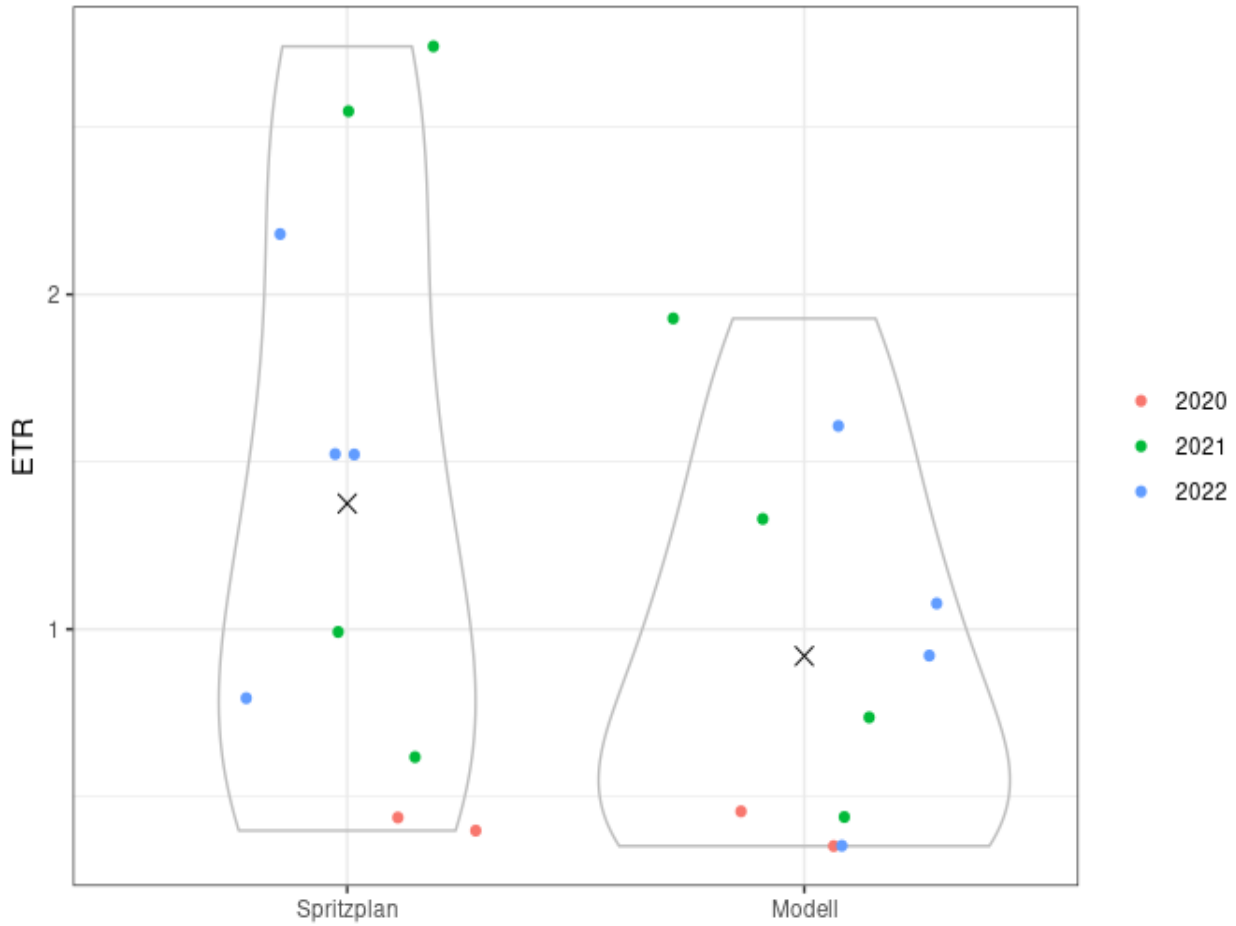


Abbildung 9: Potenzielle Risiken der Rebbau-Spritzpläne für Organismen in Oberflächengewässern. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid-Einträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage für die Jahre 2020 bis 2022. Links für die effektiven Fungizid-Applikationen (Spritzplan). Rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). X = Mittelwert.

Abbildung 10 zeigt die durchschnittlichen Risikopotentiale pro Parzelle, aufgeschlüsselt nach Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische). Die aquatischen Primärproduzenten umfassen Algen, Cyanobakterien und höhere Pflanzen. Der grösste Teil der berechneten potenziellen Risiken stammt von Drifteinträgen (66 %) gefolgt von Einträgen via Oberflächenabschwemmung (21 %) und Drainage (12 %). Verglichen mit den tatsächlichen *Spritzplänen* liegen die Risiken für die optimierten theoretischen Spritzpläne (*Modell*) für Drifteinträge 34 %, Oberflächenabschwemmungseinträge 29 % und Drainageeinträge 29 % niedriger. Die berechnete Risikoreduktion beträgt für Fische 36 %, für aquatische Invertebraten 32 % und aquatische Primärproduzenten 27 %. Die gemäß den Berechnungen am stärksten zum Gesamtrisiko beitragenden Fungizid-Wirkstoffe in den Rebenspritzplänen waren Folpet (43 %), Kupfer (als Hydroxid) (22 %), Trifloxystrobin (10 %) und Amisulbrom (8 %). Berechnet wurden, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, nur akute Risiken.

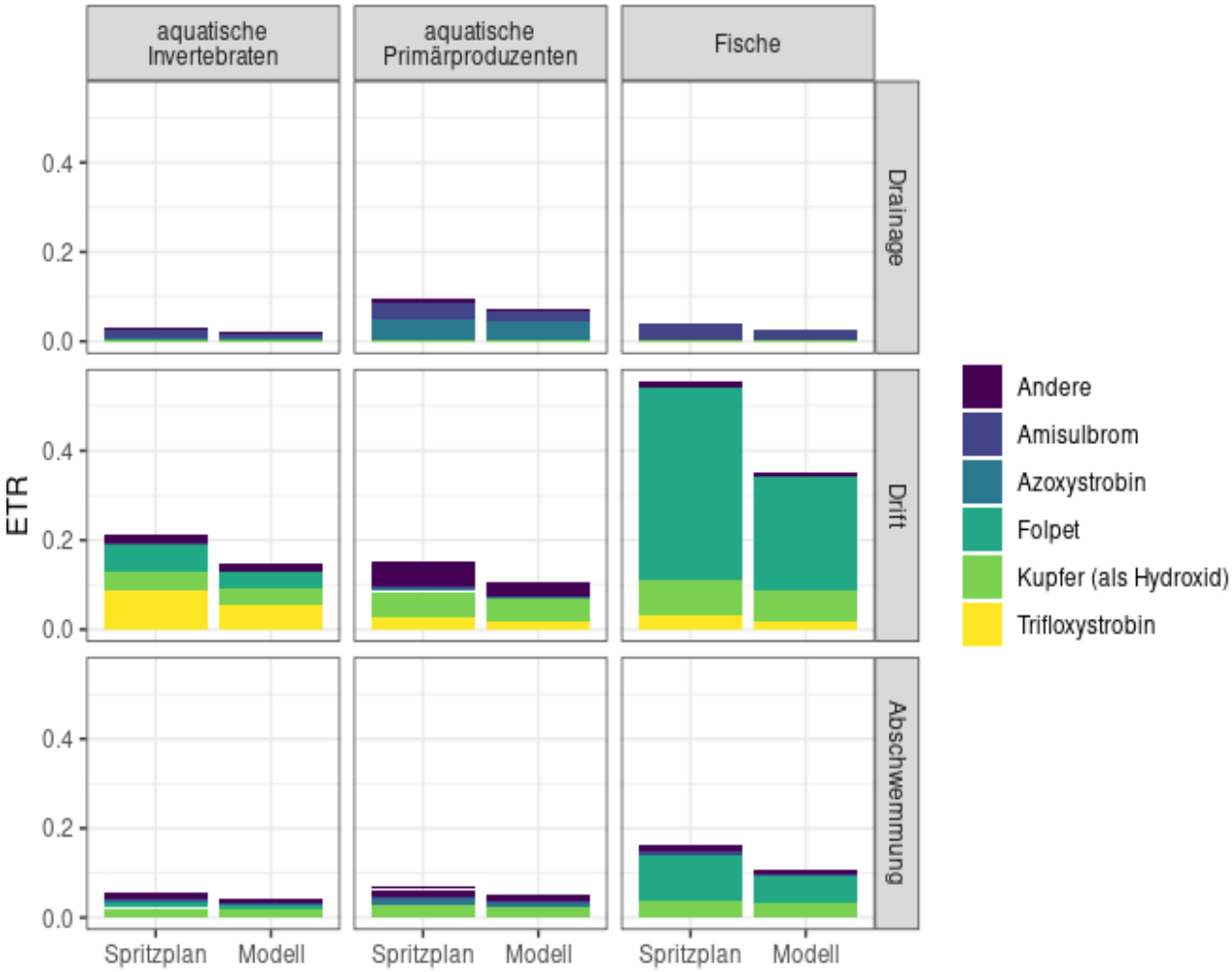


Abbildung 10: Durchschnittliche potenzielle Risiken für Organismen in Oberflächengewässern der Rebbau-Spritzpläne in den Projektjahren 2020 bis 2022. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid-Einträge und dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Wirkstoff. Jeweils links für die effektiven Spritzpläne und rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell).

5.3.2 Spot-Spraying F & I (M 4)

Verminderung von Fungizid (F) und Insektizid (I) Einsatzmengen durch Spot-Spraying auf Salatkulturen

Zwischen 2022 und 2024 wurden auf total 8 Salatparzellen einzelne Flächenbehandlungen mit Fungiziden und Insektiziden durch Spot-Spraying Behandlungen ersetzt (*Spot*). Zum Vergleich wurde ein theoretischer Feldkalender notiert, in dem sämtliche Applikationen als Flächenbehandlungen (*Fläche*) erfolgten. Es gilt zu beachten, dass die Variante *Fläche* nicht im Feld getestet wurde.

Anzahl Interventionen

Durch das Ersetzen einzelner Flächenspritzungen mit Spot-Spraying Behandlungen konnte die Anzahl kompletter Fungizid-Interventionen durchschnittlich von 1,12 auf 0,73 reduziert werden, was einer Reduktion von 36 % entspricht. Bei den Insektizid-Interventionen betrug die durchschnittliche Reduktion 44 % (2,62 vs. 1,47) (Abbildung 11).

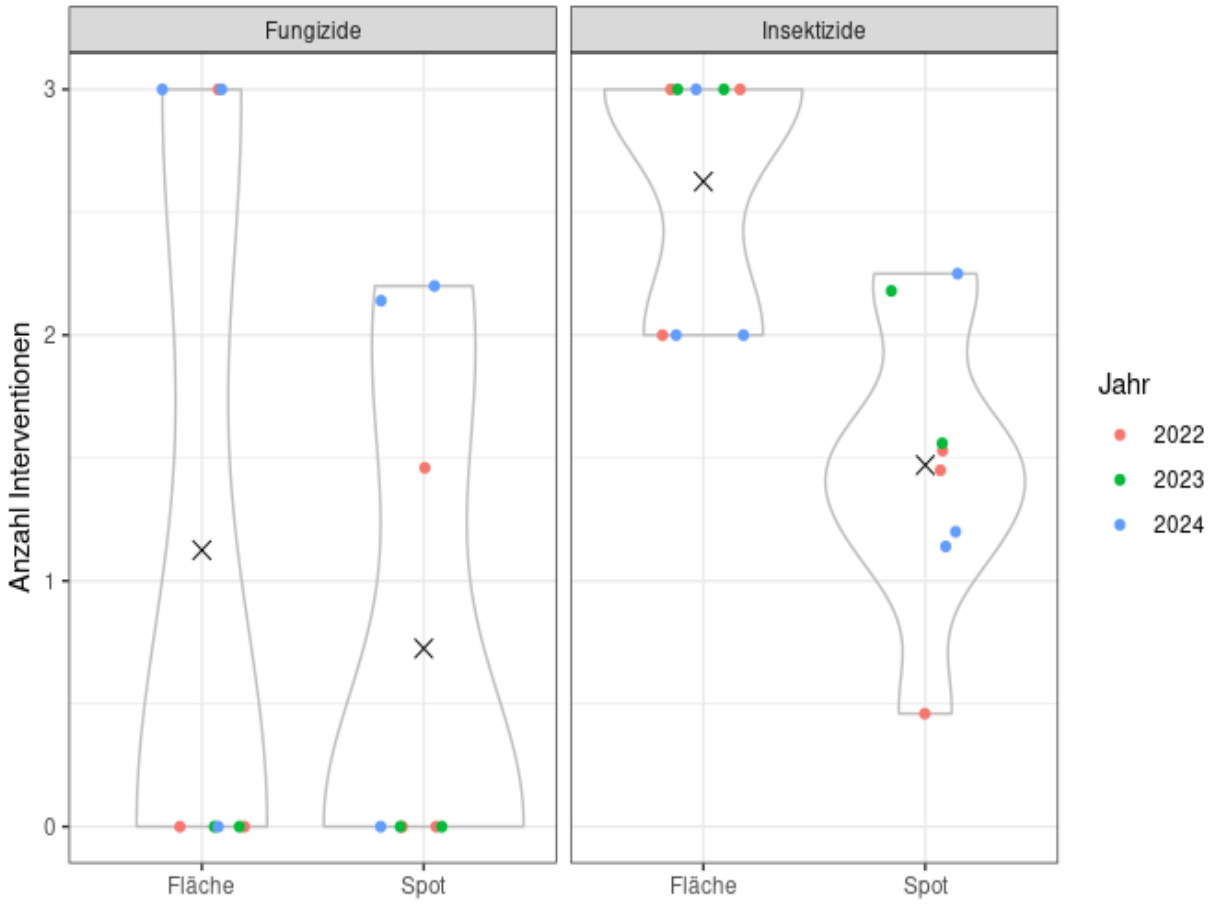


Abbildung 11: Anzahl Fungizid- (links) und Insektizid-Interventionen (rechts) auf Salatkulturen mit der Massnahme Spot-Spraying (Spot, jeweils rechts) in den Jahren 2022 bis 2024. Zum Vergleich ist jeweils links die voraussichtlich notwendige Anzahl an Interventionen bei reiner Flächenbehandlung (Fläche) dargestellt. X = Mittelwert.

Applizierte Wirkstoffmenge

Die auf den Salatparzellen durchschnittlich applizierte Wirkstoffmenge betrug 0,48 kg/ha (davon 0,3 kg/ha Fungizide und 0,18 kg/ha Insektizide; *Spot*). Wären alle Anwendungen als Flächenapplikationen erfolgt (*Fläche*), so hätte die durchschnittliche Wirkstoffmenge 0,74 kg/ha betragen (davon 0,43 kg/ha Fungizide und 0,31 kg/ha Insektizide). Die Reduktion der applizierten Wirkstoffmenge durch Spot-Spraying betrug somit gesamthaft 35 % bzw. 31 % für die Fungizide und 41 % für die Insektizide (Abbildung 12).

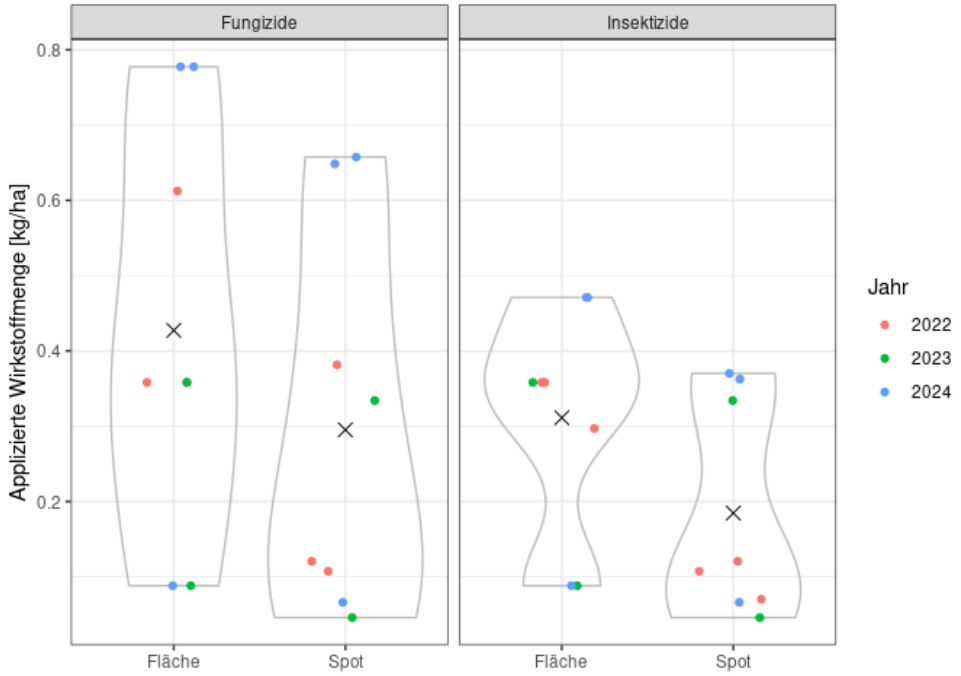


Abbildung 12: Applizierte Fungizid- (links) und Insektizid-Wirkstoffmenge [kg/ha] (rechts) auf Salatkulturen mit der Massnahme Spot-Spraying (Spot, jeweils rechts) in den Jahren 2022 bis 2024. Zum Vergleich ist jeweils links die voraussichtlich notwendige Wirkstoffmenge bei reiner Flächenbehandlung (Fläche) dargestellt. X = Mittelwert.

Risikopotentiale

Die berechneten akuten potenziellen Risiken für aquatische Organismen lagen für die Spot-Spraying Spritzfolgen (*Spot*) insgesamt rund 59 % niedriger als für dieselben Spritzfolgen mit reinen Flächenbehandlungen (*Fläche*). Für Fungizide beträgt die Risikoreduktion 4 % und für Insektizide 76 % (Abbildung 13).

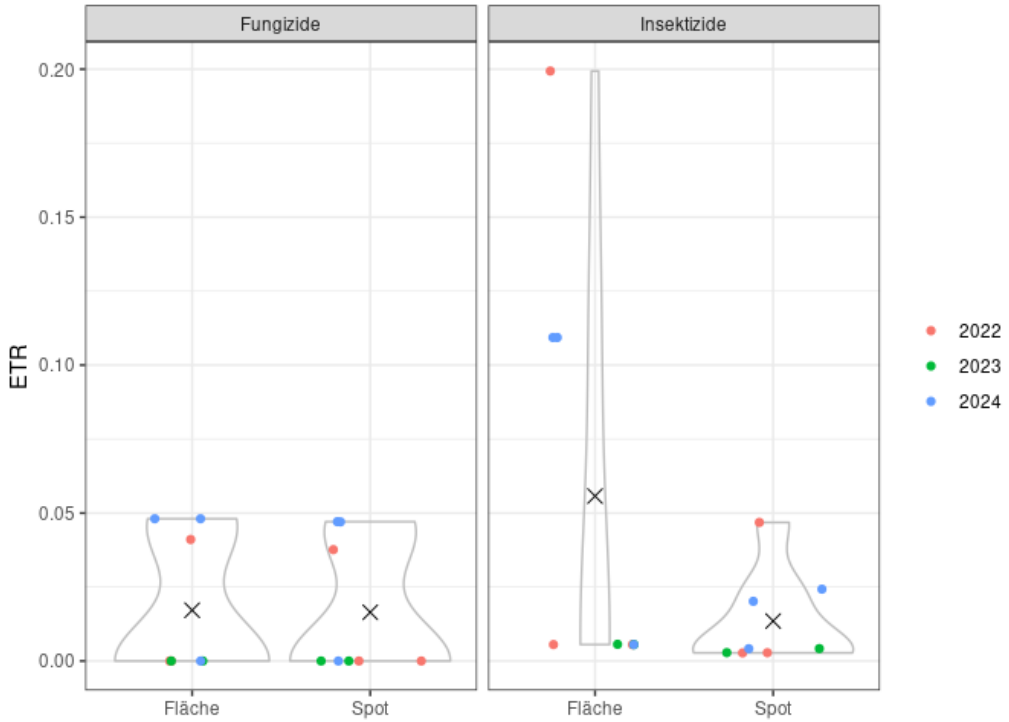


Abbildung 13: Potenzielle Risiken der Salat-Spritzpläne für Organismen in Oberflächengewässern. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid- bzw. Insektizid-Einträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage für die Jahre 2022 bis 2024. Jeweils rechts für Salatkulturen mit teilweise Spot-Behandlungen (Spot) und zum Vergleich jeweils links für reine Flächenbehandlungen (Fläche). X = Mittelwert.

Abbildung 14 zeigt die durchschnittlichen Risikopotentiale der Salatparzellen je Wirkstoff, aufgeschlüsselt nach Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische). Der grösste Teil der berechneten potenziellen Risiken (über alle Parzellen gerechnet) stammt von Einträgen via Oberflächenabschwemmung (52 %) gefolgt von Drifteinträgen (44 %) und Drainage (4 %). Durch Ersatz einzelner Flächenspritzungen mit Spot-Spraying Behandlungen wurden die Risiken von Einträgen via Oberflächenabschwemmung um 67 %, via Drift um 50 % und via Drainage um 40 % reduziert.

Die gemäß den Berechnungen am stärksten zum Gesamtrisiko beitragenden Wirkstoffe (über alle Parzellen gerechnet) waren die Insektizide Spinosad (51 %), Acetamiprid (10 %) und Azadirachtin A (5 %) sowie die Fungizide Cyprodinil (15 %) und Fludioxonil (11 %).

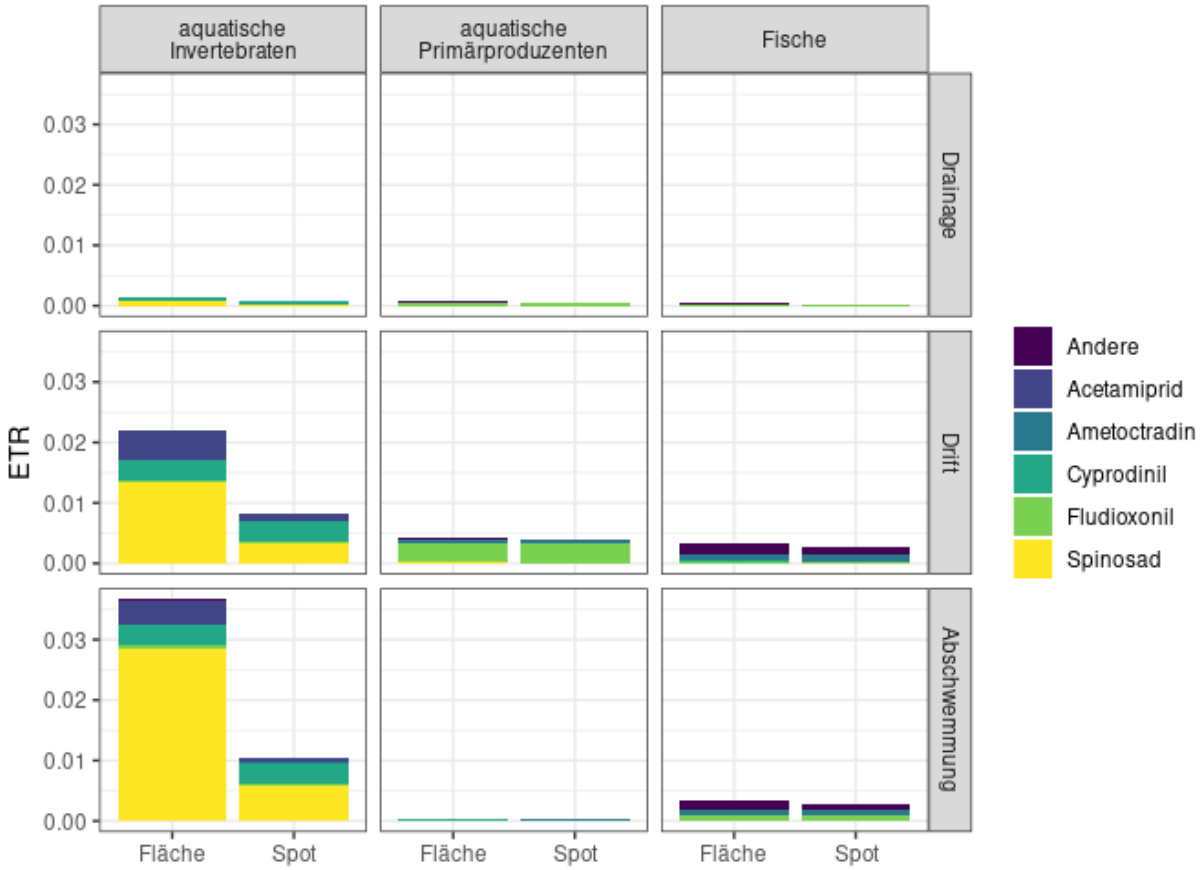


Abbildung 14: Durchschnittliche potenzielle Risiken für Organismen in Oberflächengewässern der Salat-Spritzpläne in den Projektjahren 2022 bis 2024. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid- und Insektizid-Einträge, dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Wirkstoff. Jeweils rechts für Salatkulturen mit teilweise Spot-Behandlungen (Spot) und zum Vergleich jeweils links für reine Flächenbehandlungen (Fläche).

5.3.3 Spot-Spraying H (M 4)

Verminderung von Herbizid (H) Einsatzmengen durch Spot-Spraying im Zwiebelanbau

Im Rahmen der Massnahme 4 Spot-Spraying wurden im Jahr 2024 drei Zwiebelparzelllen unterschiedlich mit Herbiziden behandelt. Auf der Referenzparzelle (*Fläche*) erfolgten 10 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden. Auf der zweiten Parzelle (*Spot Herbizid*) wurden 5 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden durchgeführt. Auf der dritten Parzelle (*Spot Fettsäure*) erfolgten 5 Flächenbehandlungen und 1 Spot-Spraying Behandlung mit konventionellen Herbiziden sowie 4 Spot-Spraying Behandlungen mit Fettsäuren.

Durch das Spot-Spraying in der Variante ***Spot Herbizid*** konnten die Anzahl komplette Herbizid-Interventionen um 43 %, die applizierte Wirkstoffmenge um 57 % und die potenziellen akuten Risiken für aquatische Organismen um 19 % reduziert werden im Vergleich zur Variante *Fläche*.

Die Anzahl Interventionen in der Variante ***Spot Fettsäure*** waren, verglichen mit der Variante *Fläche*, ebenfalls niedriger (41 %), die applizierte Wirkstoffmenge jedoch deutlich höher (12,1 vs. 7,3 kg/ha). Die berechnete Risikoreduktion lag bei 19 % (Abbildung 15).

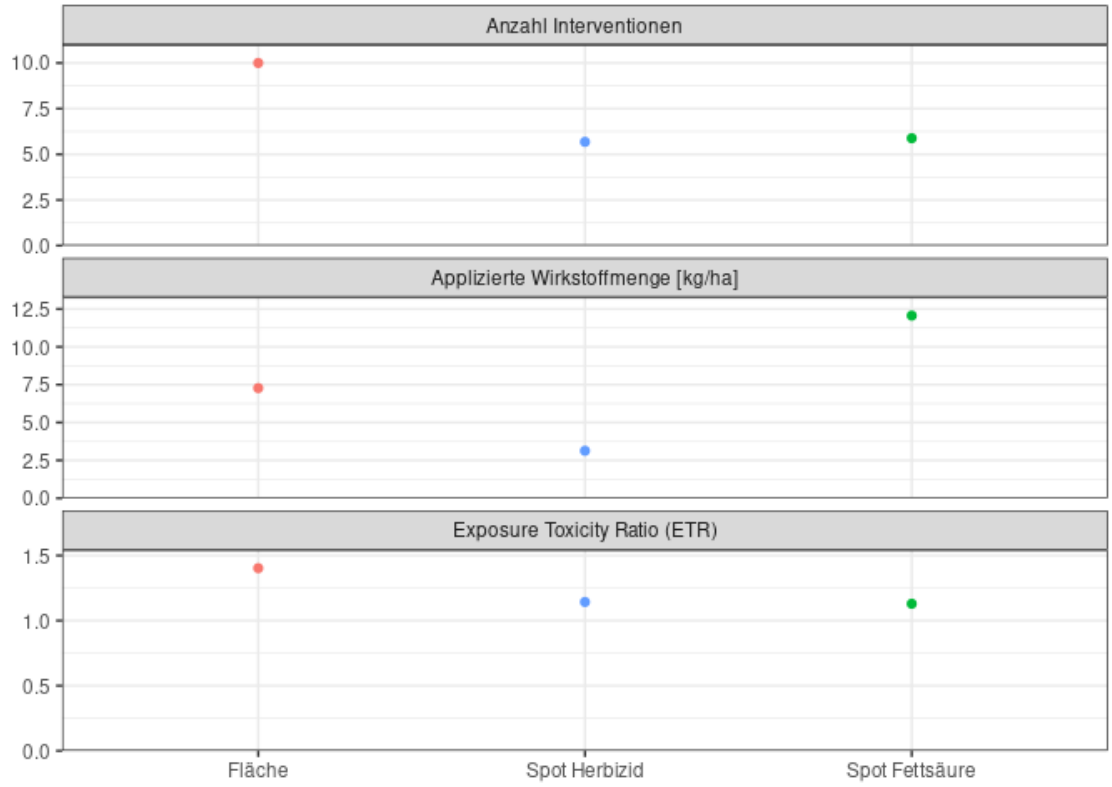


Abbildung 15: Übersicht über die berechneten Kennzahlen und Risikopotentiale für Zwiebelparzellen im PFLOPF Projekt mit der Massnahme 4 Spot-Spraying. Oben: Anzahl komplette Herbizid-Interventionen; Mitte: Applizierte Wirkstoffmenge [kg/ha]; Unten: Berechnete Risikopotentiale (als ETR) für aquatische Organismen durch Wirkstoffeinträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage; Links: 10 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Fläche); Mitte: 5 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Spot Herbizid); Rechts: 1 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden und 4 Spot-Spraying Behandlungen mit Fettsäuren (Spot Fettsäure).

Die Risikopotentiale pro Parzelle, aufgeschlüsselt nach Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), können Abbildung 16 entnommen werden. Wie für Herbizid-Anwendungen zu erwarten, gelten die potenziellen Risiken vor allem für aquatische Primärproduzenten.

Auf der Referenzparzelle *Fläche* mit 10 Flächenapplikationen entfallen 78 % der berechneten Risiken auf den Wirkstoff Pendimethalin. Dieser Wirkstoff wurde im Produkt Stomp Aqua auf allen drei Parzellen in je einer Flächenapplikation ausgebracht. Da Pendimethalin das Gesamtrisiko dominiert, konnte der reduzierte Einsatz anderer Wirkstoffe das Gesamtrisiko nicht wesentlich beeinflussen. Ohne die Anwendung von Stomp Aqua (auf allen drei Parzellen) hätte die Risikoreduktion 84 (*Spot Herbizid*) und 88 % (*Spot Fettsäure*) betragen.

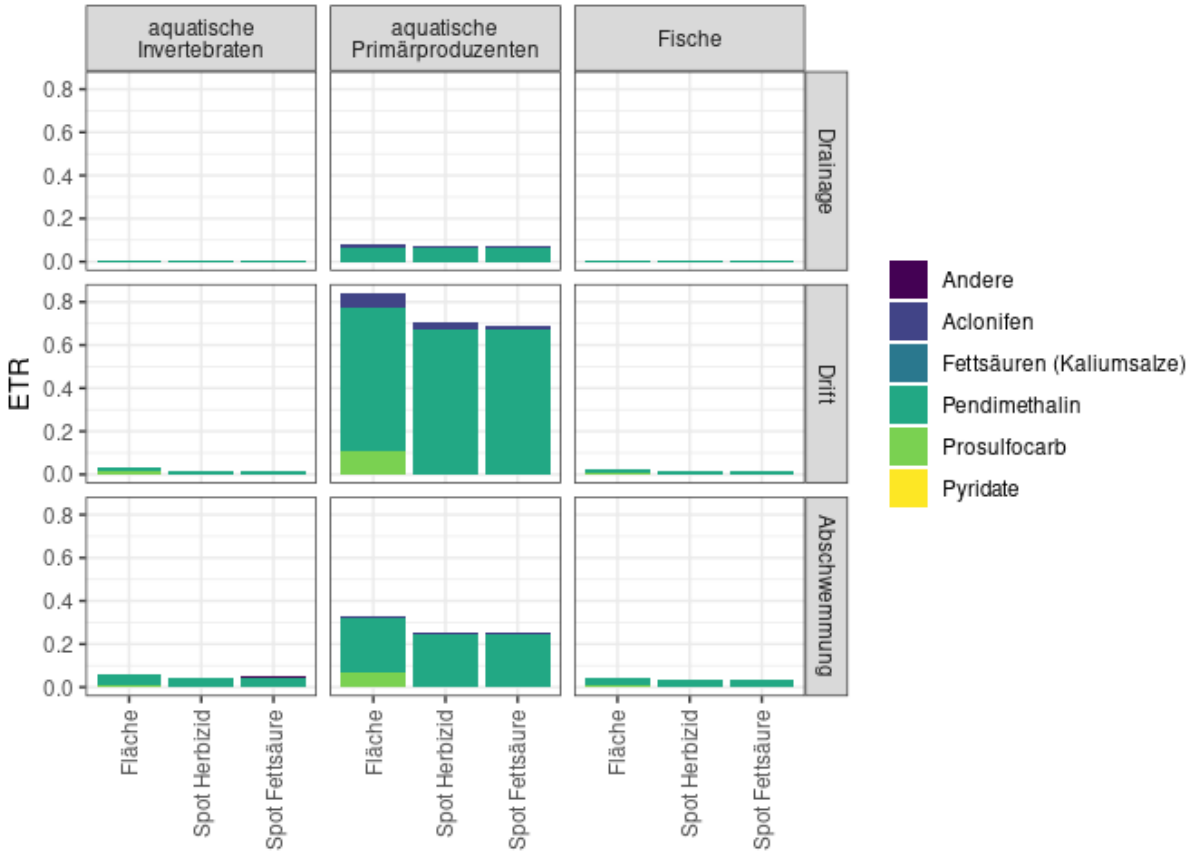


Abbildung 16: Je Parzelle durchschnittliche potenzielle Risiken für Organismen in Oberflächengewässern der Herbizid-Spritzpläne auf Zwiebelparzellen im Projektjahr 2024. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Herbizid-Einträge und dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Wirkstoff. Links: 10 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Fläche); Mitte: 5 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Spot Herbizid); Rechts: 1 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden und 4 Spot-Spraying Behandlungen mit Fettsäuren (Spot Fettsäure).

5.3.4 Hacken (M 5)

Verminderung von Herbizid-Einsatzmengen im Feldbau durch sensorgesteuertes Hacken

Im Rahmen der Massnahme 5 wurden in Feld- und Gemüsekulturen Hackgeräte eingesetzt, um den Einsatz von Herbiziden zu verringern. Flächenbehandlungen wurden dabei teilweise oder komplett durch Hacken oder Hacken in Kombination mit Bandbehandlungen ersetzt. Die mechanischen Behandlungen und verbliebenen Herbizid-Anwendungen wurden in einem Feldkalender festgehalten (*Hacken*). Zum Vergleich wurde ein theoretischer Spritzplan notiert (*Fläche*) mit vermutlich notwendigen Herbizid-Flächenbehandlungen ohne den Einsatz von Hackgeräten. Es sollte beachtet werden, dass die Variante *Fläche* nicht im Feld getestet wurde.

Anzahl Interventionen

Durchschnittlich (2020–2024, alle M5 Kulturen) wurden rund 1,9 Herbizid-Interventionen je Parzelle (*Fläche*) geschätzt (Schwankungsbereich: 1–5). Auf den Parzellen mit der umgesetzten Massnahme (*Hacken*) konnten diese um 66 % auf durchschnittlich 0,7 komplette Herbizid-Interventionen reduziert werden (Schwankungsbereich: 0–3; siehe Abbildung 17).

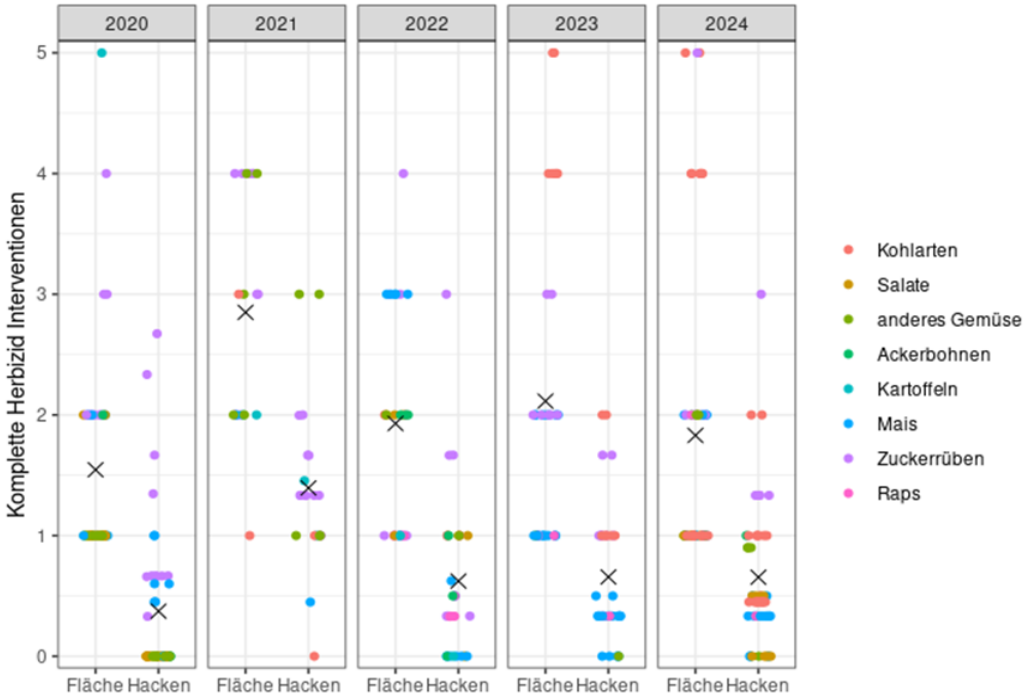


Abbildung 17: Anzahl komplette Herbizid-Interventionen je Schlag mit der Massnahme Hacken (jeweils rechts) und je Schlag geschätzte Herbizid-Interventionen ohne Hacken (Fläche; jeweils links) in den Projektjahren 2020 bis 2024. Dargestellt je Jahr. Kohlarten: Weisskohl, Chinakohl und Kohlrabi; Salate: Eisberg, Kopfsalat, Eichblatt und Batavia; Anderes Gemüse: Karotten, Lauch, Kürbisse und Sellerie. X = Mittelwert.

Bei Salaten konnten mit 86 % die meisten Herbizid-Behandlungen eingespart werden (1,2 vs. 0,2 Interventionen), da diese häufig gehackt statt gespritzt wurden. Am niedrigsten war die Reduktion mit 48 % bei Zuckerrüben (2,5 vs. 1,3 Interventionen), da die Flächenbehandlungen hier überwiegend durch Hacken in Kombination mit Bandspritzung ersetzt wurden (Abbildung 18 und Tabelle 7).

Abbildung 18: Anzahl komplette Herbizid-Interventionen je Schlag mit der Massnahme Hacken (jeweils rechts) und je Schlag geschätzte Herbizid-Interventionen ohne Hacken (Fläche; jeweils links) in den Projektjahren 2020 bis 2024. Dargestellt je Kulturgruppe. Kohlarten: Weisskohl, Chinakohl und Kohlrabi; Salate: Eisberg, Kopfsalat, Eichblatt und Batavia; Anderes Gemüse: Karotten, Lauch, Kürbisse und Sellerie. X = Mittelwert.

Applizierte Wirkstoffmenge

Gegenüber den vermutlich notwendigen Herbizid-Wirkstoffmengen für reine Flächenbehandlungen (*Fläche*) konnten durch die Massnahme Hacken durchschnittlich (2020–2024, alle M5 Kulturen) 62 % der Herbizid-Wirkstoffmengen eingespart werden (1,4 vs. 0,5 kg/ha; siehe Abbildung 19). Die mittlere Reduktion pro Jahr ist abhängig von der Kulturzusammensetzung und den Wetterbedingungen.

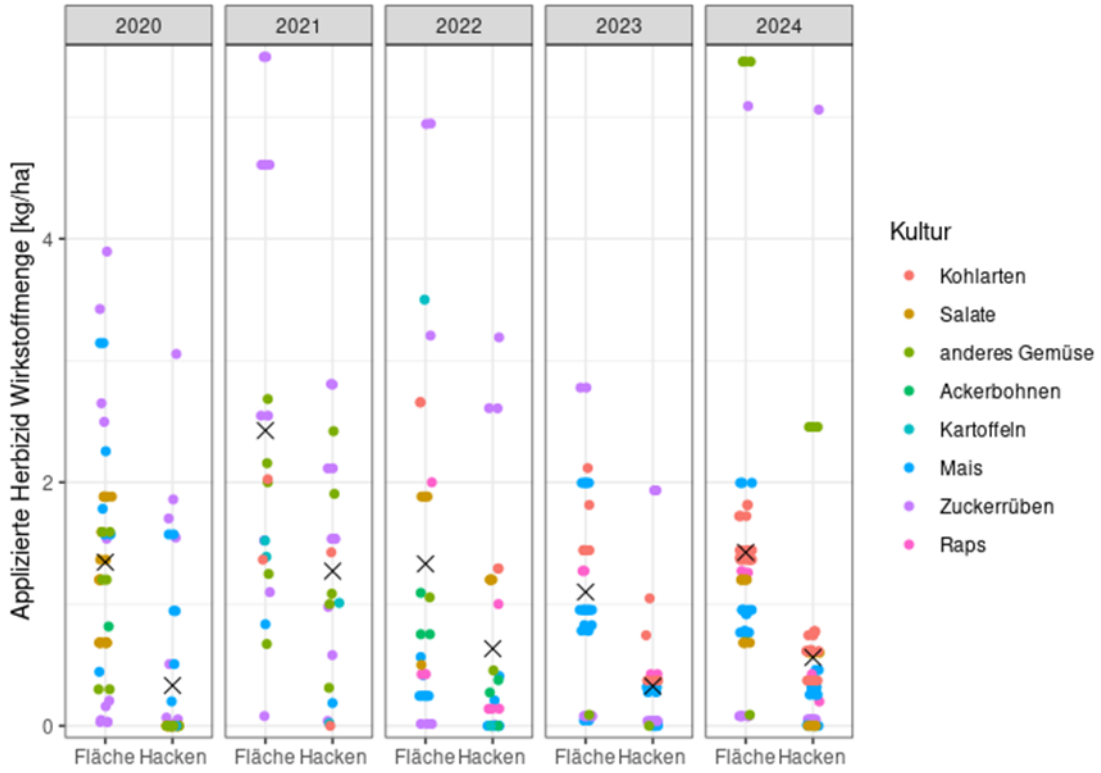


Abbildung 19: Applizierte Herbizid-Wirkstoffmenge in kg/ha je Schlag mit der Massnahme Hacken (jeweils rechts) und je Schlag geschätzte Menge ohne Hacken (Fläche; jeweils links) in den Projektjahren 2020 bis 2024. Dargestellt je Jahr. Kohlarten: Weisskohl, Chinakohl und Kohlrabi; Salate: Eisberg, Kopfsalat, Eichblatt und Batavia; Anderes Gemüse: Karotten, Lauch, Kürbisse und Sellerie. X = Mittelwert.

Für alle Kulturgruppen konnte die applizierte Herbizid-Wirkstoffmenge durch Hacken deutlich reduziert werden. Die Reduktionen lagen je Kulturgruppe zwischen 40 % (Zuckerrüben) und 88 % (Kartoffeln) (Abbildung 20 und Tabelle 7).

Abbildung 20: Applizierte Herbizid-Wirkstoffmenge in kg/ha je Schlag mit der Massnahme Hacken (jeweils rechts) und je Schlag geschätzte Menge ohne Hacken (Fläche; jeweils links) in den Projektjahren 2020 bis 2024. Dargestellt je Kulturgruppe. Kohlarten: Weisskohl, Chinakohl und Kohlrabi; Salate: Eisberg, Kopfsalat, Eichblatt und Batavia; Anderes Gemüse: Karotten, Lauch, Kürbisse und Sellerie. X = Mittelwert.

Tabelle 7: Durchschnittliche Anzahl komplette Herbizid-**Interventionen** und applizierte Herbizid-**Wirkstoffmenge** für alle Kulturen und je Kulturgruppe auf den Flächen mit der Massnahme **Hacken** und auf denselben Flächen geschätzte Herbizid-Interventionen ohne Hacken als **Fläche**napplikationen, sowie die entsprechende **Reduktion**.

Anwendungs-gebiet	**Kulturgruppe**	**Anzahl Parzellen**	**Anzahl Interventionen**			**Applizierte Wirkstoffmenge**		
			Fläche	**Hacken**	**Reduktion [%]**	**Fläche [kg/ha]**	**Hacken [kg/ha]**	**Reduktion [%]**
Ackerkulturen	Ackerbohnen	5	2,0	0,5	75	0,8	0,2	75
	Kartoffeln	4	2,5	0,6	75	2,1	0,3	88
	Mais	47	1,5	0,3	80	1,1	0,3	75
	Raps	8	1,1	0,4	67	1,0	0,4	65
	Zuckerrüben	40	2,5	1,3	48	1,8	1,1	40
	alle	**104**	**1,9**	**0,7**	**63**	**1,4**	**0,6**	**58**
Gemüse-kulturen	Kohlarten	29	2,8	0,9	68	1,6	0,6	62
	Salate	30	1,2	0,2	86	1,2	0,2	83
	anderes Gemüse	17	1,8	0,7	59	1,9	0,9	55
	alle	**76**	**1,9**	**0,6**	**70**	**1,5**	**0,5**	**66**
Acker- und Gemüse-kulturen	**alle**	**180**	**1,9**	**0,7**	**66**	**1,4**	**0,5**	**62**

Risikopotentiale

Durchschnittlich (2020–2024, alle M5 Kulturen) liegen die berechneten potenziellen Risiken für Organismen in Oberflächengewässern für die durch die Massnahme Hacken wegfallenden oder reduzierten Herbizid-Applikationen (*Hacken*) rund 73 % niedriger als für die vermutlich notwendigen Herbizid-Applikationen ohne Hacken (*Fläche*).

Die Risikoreduktion beträgt durchschnittlich 75 % bei Ackerbohnen, 91 % bei Kartoffeln, 86 % bei Mais, 63 % bei Raps und 53 % bei Zuckerrüben sowie 87 % bei Salaten, 74 % bei Kohlarten und 55 % bei anderen Gemüsesorten. Für Herbizid-Applikationen auf Parzellen mit Raps oder Kohlarten liegen die durchschnittlichen Risiken deutlich höher als bei den anderen Kulturen (Abbildung 21).

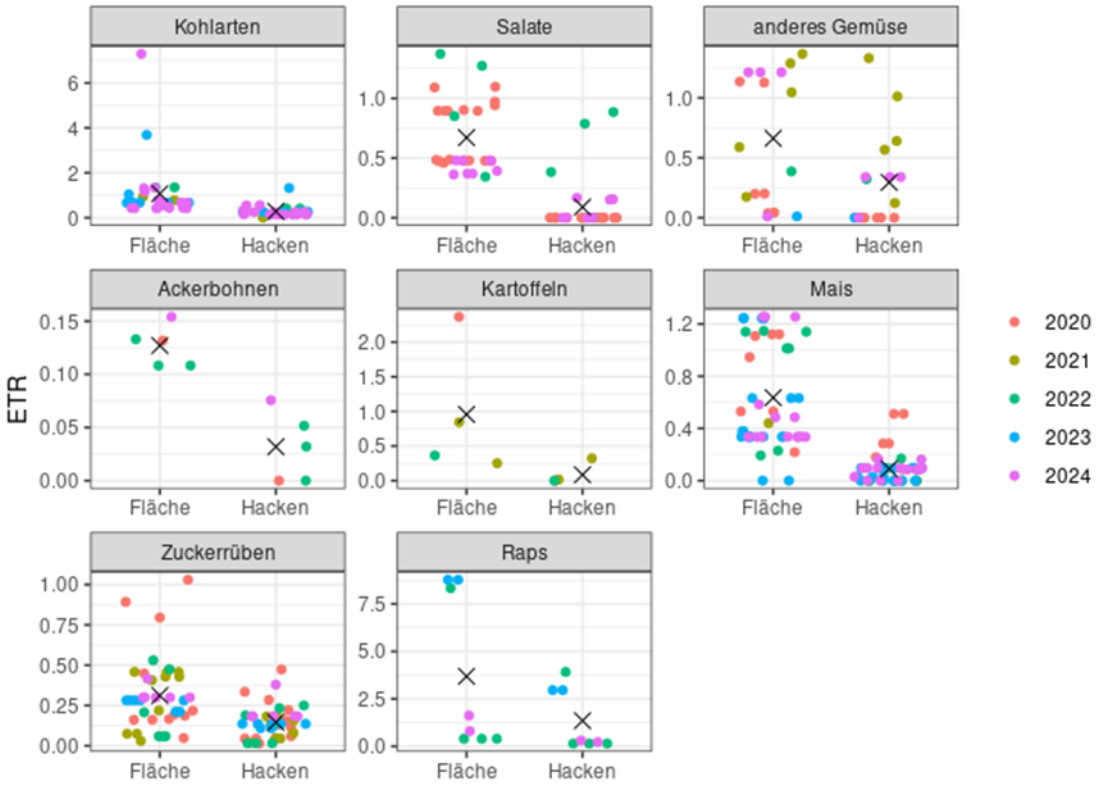


Abbildung 21: Potenzielle Risiken der Acker- und Gemüse-Spritzpläne in den Projektjahren 2020 bis 2024 für Organismen in Oberflächengewässern. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Herbizid-Einträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage. Jeweils links je Parzelle mit der Massnahme Hacken und rechts für die vermutlich notwendigen Herbizid-Applikationen je Parzelle ohne Hacken (Fläche). Dargestellt je Kulturgruppe mit jeweils unterschiedlichen y-Achsen. Kohlarten: Weisskohl, Chinakohl und Kohlrabi; Salate: Eisberg, Kopfsalat, Eichblatt und Batavia; Anderes Gemüse: Karotten, Lauch, Kürbisse und Sellerie. X = Mittelwert.

In Abbildung 22 sind die durchschnittlichen Risikopotentiale pro Parzelle, aufgeschlüsselt nach Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), dargestellt. Die berechneten potenziellen Risiken gelten vor allem für aquatische Primärproduzenten. Da es sich nur um Herbizide handelt, war dies nicht anders zu erwarten.

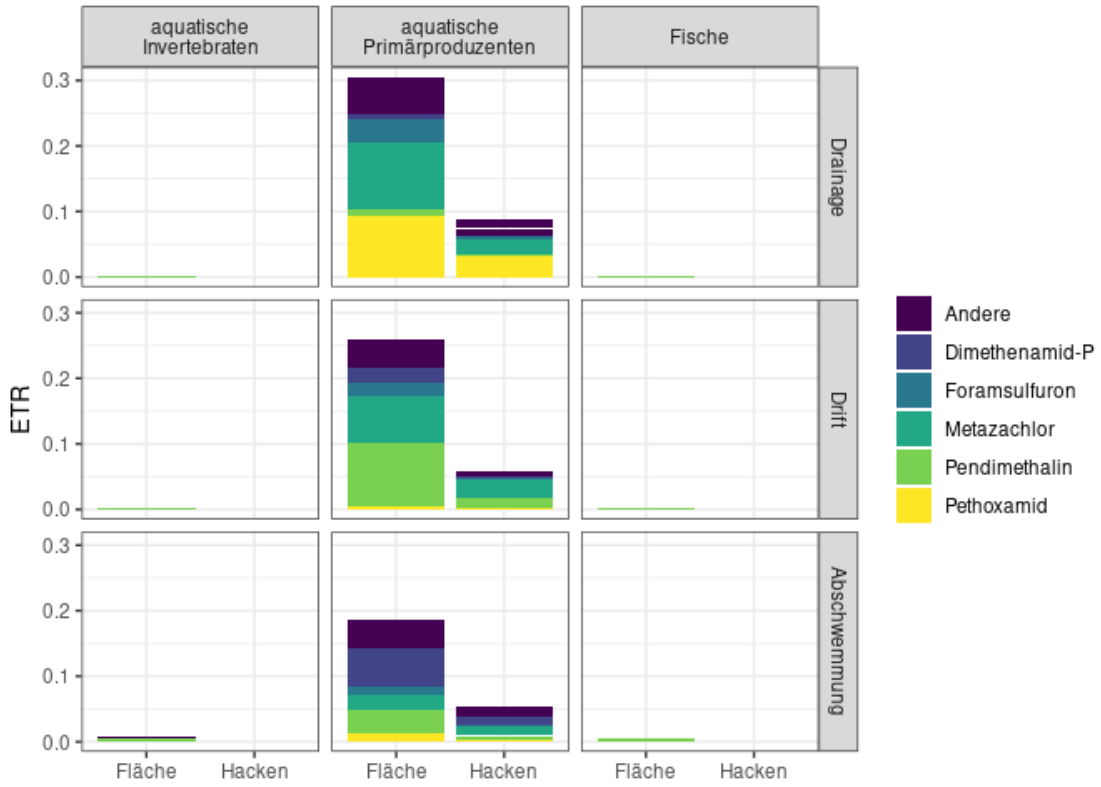


Abbildung 22: Durchschnittliche (2020–2024) potenzielle Risiken pro Parzelle der M5-Spritzfolgen für Organismen in Oberflächengewässern. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Herbizid-Einträge und dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage) und Wirkstoff. Jeweils rechts für die effektiven Herbizid-Spritzpläne der Parzellen mit der Massnahme 5 Hacken und links für die theoretischen Spritzpläne (Fläche) ohne Hacken.

5.3.5 Zusammenfassung der Resultate

Angepasste Dosierung im Rebbau: Auf den Rebenparzellen im PFLOPF Projekt wurden in den Jahren von 2020 bis 2022 durchschnittlich 17 kg/ha Fungizid-Wirkstoffe in 8 Fungizid-Interventionen appliziert (Variante *Spritzplan*). Unter Berücksichtigung der mit dem Modell *Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen* berechneten optimierten Aufwandmengen (Variante *Modell*) hätten rund 44 % dieser Wirkstoffmengen eingespart werden können. Mit den im *Modell* berechneten Einsatzmengen konnte für diesen Zeitraum zudem eine potenzielle akute Risikoreduktion für aquatische Organismen von rund 33 % verglichen mit den tatsächlichen *Spritzplänen* berechnet werden.

Spot-Spraying F & I auf Salatkulturen: Verglichen mit reinen Flächenbehandlungen (Variante *Fläche*) konnten mit der Variante *Spot* (Spot- und Flächenbehandlungen) auf Salatparzellen die Anzahl Interventionen um 41 % und die applizierte Wirkstoffmenge um 35 % reduziert werden. Vor allem der reduzierte Einsatz von Insektiziden durch das Spot-Spraying führte zu einer Reduktion der potenziellen akuten Risiken für aquatische Organismen von 59 %.

Spot-Spraying Herbizid im Zwiebelanbau: Durch das teilweise Ersetzen von Flächenbehandlungen durch Spot-Spraying (jeweils 5 von 10 Behandlungen) konnte auf Zwiebelparzellen mit den Varianten *Spot Herbizid* (mit konventionellen Herbiziden) und *Spot Fettsäure* (mit teilweise alternativen Herbiziden) die Anzahl der vollständigen Herbizid-Interventionen von 10 auf 5,7 bzw. 5,9 reduziert werden. Die berechneten akuten potenziellen Risiken für aquatische Organismen konnten jeweils um 19 % reduziert werden. Dass die Wirkstoffmengen auf der Parzelle *Spot Fettsäure* aufgrund der höheren Aufwandmengen von Produkten, die Fettsäuren enthalten, größer waren als auf den beiden anderen Parzellen, wirkte sich bei der Risikoberechnung kaum aus, da deren Toxizität im Vergleich zu anderen Herbizid-Wirkstoffen für aquatische Organismen deutlich geringer ist.

Hacken und Bandspritzung im Acker- und Gemüsebau: Durch Hacken und Bandspritzungen konnten durchschnittlich (2020–2024, alle M5 Kulturen) 66 % der Herbizid-Interventionen und 62 % der applizierten Herbizid-Wirkstoffmenge eingespart werden. Durch den reduzierten Einsatz konnten die von Herbiziden stammenden potenziellen akuten Risiken für aquatische Organismen durchschnittlich um 73 % reduziert werden gegenüber vermutlich notwendigen Herbizid-Applikationen ohne Hacken.

5.4 Fazit

Die Ergebnisse illustrieren, dass beträchtliche Wirkstoffeinsparungen durch die angepasste Dosierung im Weinbau (44 % Fungizidreduktion), durch Spot-Behandlungen in Salatkulturen (35 % Reduktion von Fungiziden und Insektiziden) sowie durch Hacken im Feld- und Gemüsebau (62 % Herbizidreduktion) erreicht werden können. Die berechneten Risiken wurden bei diesen Massnahmen um mehr als 30 % reduziert. Beim Zwiebelversuch mit der Variante *Spot Fettsäure* konnten die eingesetzten Herbizid-Wirkstoffmengen nicht reduziert werden, jedoch wurden die potenziellen Risiken für aquatische Organismen in beiden Spot-Varianten (Herbizid und Fettsäure) um 19 % gesenkt.

Es gilt zu beachten, dass die meisten Berechnungen nur Fungizid-Applikationen bzw. nur Herbizid-Applikationen enthalten, während in kompletten Spritzfolgen (wenn eingesetzt) oft Insektizide die potenziellen Risiken dominieren. Ebenfalls wurden einige Spritzfolgen für die Berechnungen geschätzt und im Feld nicht getestet, was Unsicherheiten in den Resultaten mit sich bringen kann. Schliesslich handelt es sich bei den Risikoberechnungen um stark vereinfachte Berechnungen, die lediglich potenzielle akute Risiken aufzeigen und beispielsweise Einträge über hydraulische Kurzschlüsse oder Punkteinträge nicht berücksichtigen können.

5.5 Ergänzende Informationen

5.5.1 Wirkstoffeigenschaften

Tabelle 8: Für PEC Berechnungen verwendete Wirkstoffeigenschaften. KOC = Adsorptionskoeffizient. DT50BODEN = Halbwertszeit im Boden.

Wirkstoff	KOC	DT50BODEN
Aclonifen	7126.00	117.000
Ametoctradin	7713.00	1.800
Amisulbrom	284.00	143.000
Azoxystrobin	589.00	78.000
Benalaxyl-M	4998.00	33.200
Bentazon	55.30	20.000
Benthiavalicarb-isopropyl	180.56	14.300
Boscalid	771.00	200.000
Clomazone	300.00	83.000
Clopyralid	5.00	23.200
Cyazofamid	1338.00	10.000
Cyflufenamid	1595.00	33.800
Cymoxanil	43.60	0.700
Cyprodinil	1706.00	37.000
Desmedipham	1500.00	52.000
Dicamba	12.36	4.000
Difenoconazole	3759.00	130.000
Dimethenamid-P	170.00	11.000
Dimethomorph	402.00	57.000
Dinatriumphosphonat	952.00	187.000
Diquat	2185000.00	2345.000
Ethofumesate	147.00	21.600
Fenhexamid	475.00	0.430
Fluazifop-P-butyl	3394.00	1.000

Wirkstoff	KOC	DT50BODEN
Fluazinam	16430.00	11.000
Fludioxonil	145600.00	164.000
Flufenacet	401.00	19.700
Fluxapyroxad	728.00	183.000
Folpet	304.00	4.700
Foramsulfuron	70.00	25.400
Fosetyl	190.00	0.018
Imazamox	67.00	200.200
Iodosulfuron-methyl-Natrium	21.20	2.700
Kaliumphosphonat	376.00	131.300
Kupfer (als Hydroxid)	12000.00	10000.000
Kupfer (als Kalkpräparat)	1000000.00	10000.000
Kupfer (als Oxychlorid)	1000000.00	10000.000
Kupfer (als Oxysulfat)	9500.00	1.000
Lenacil	165.00	179.000
Mandipropamid	847.00	49.100
Mesotrione	122.00	19.600
Metalaxyl-M	162.00	36.000
Metamitron	77.70	30.000
Metazachlor	54.00	8.600
Metrafenone	7061.00	250.600
Metribuzin	37.90	11.500
Myclobutanil	517.00	560.000
Napropamide	839.00	70.000
Nicosulfuron	30.00	26.000
Penconazole	2060.00	117.000
Pendimethalin	17491.00	182.300
Pethoxamid	154.00	6.300
Phenmedipham	1775.00	12.000
Propyzamide	840.00	50.500
Proquinazid	12870.00	45.000
Pyraflufen-ethyl	1949.00	0.320
Quinmerac	86.00	30.000
S-Metolachlor	238.00	15.000
Schwefel	1950.00	30.000
Spiroxamine	2415.00	25.000
Tembotrione	66.00	14.500
Terbuthylazine	350.00	75.100
Thiencarbazone	100.00	11.600
Trifloxystrobin	2387.00	0.340
Triflusulfuron-methyl	58.00	3.000
Zoxamid	1224.00	6.400

Quelle: Julius Kühn-Institut (JKI). Strassemeyer et al. (2017). Tabelle i_Wirkstoffe. Version 08.08.2022.

5.5.2 Toxizitätsendpunkte

Für die im PFLOPF Projekt applizierten Wirkstoffe wurden akute aquatische Toxizitätsendpunkte von OpenFoodTox datasets (Carnesecchi et al., 2023) mithilfe eines R-Paketes (Ranke, 2023) eingelesen. Wo Endpunkte fehlten oder nicht berücksichtigt werden konnten (Salzwasser-Arten wurden ausgeschlossen), wurden Endpunkte aus EFSA Conclusions oder Assesment Reports digitalisiert. Für die wenigen Kombinationen von Wirkstoff und Organismengruppe, für die keine Endpunkte aus EFSA-Studien verfügbar waren, wurden stattdessen Endpunkte aus der Pesticide Property Database (PPDB; Version 2024-10-01) verwendet (siehe Tabelle 9). Die Artnamen in dieser Tabelle wurden entsprechend dem “Open Tree of Life” (Michonneau et al., 2006) standardisiert.

Die Auswahl der relevanten akuten Toxizitäts-Endpunkte aus den oben genannten Quellen erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Berücksichtigt wurden nur akute Werte (i. d. R. EC50 oder LC50).
- Eindeutige Endpunkte wurden, sofern vorhanden, gegenüber ‘größer als’-Endpunkten (gekennzeichnet durch ein ‘>’-Zeichen) bevorzugt.
- Endpunkte aus Tests mit einer Testdauer von weniger als 15 Tagen wurden bevorzugt.
- Für Algen und Cyanobakterien wurden (je Art) Endpunkte mit einem Effekt auf die Wachstumsrate (‘growth rate’) gegenüber Endpunkten mit anderen Effekten priorisiert.
- Für Wirkstoffe, die im Wasser schnell abbauen (Halbwertszeit im Wasser und Hydrolyse < 3 Tage; z. B. Folpet und Captan) und für Schwefel (schlecht wasserlöslich), wurden – wenn möglich – Endpunkte bevorzugt, die auf nominal berechneten Konzentrationen basieren, gefolgt von Ergebnissen aus Anfangsmessungen und zuletzt solchen aus Durchschnittsmessungen.
- Für Kupferverbindungen wurden möglichst nur Endpunkte berücksichtigt, deren Konzentrationen sich auf das totale Kupfer beziehen.
- Für Paraffinöl wurde die EFSA Conclusion mit dem Referenzprodukt “Arb’Hiver” (j.efsa.2009.216r) berücksichtigt, da dieses Produkt am ehesten mit den in der Schweiz applizierten Produkten im Obstbau verglichen werden kann.
- Schliesslich wurde für jede Kombination von Wirkstoff und Organismengruppe (nach den oben genannten Kriterien) der jeweils niedrigste Endpunkt ausgewählt und für die Risikoberechnungen verwendet.

Tabelle 9: Für die ETR-Berechnungen verwendete akute aquatische Toxizitätsendpunkte

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Acetamiprid	Fische	Cyprinodon variegatus	100	Agroscope	j.efsa.2016.4610_LoEP
Acetamiprid	Invertebraten	Simulium latigonium	0.0037	Agroscope	j.efsa.2016.4610_LoEP
Acetamiprid	Primärproduzenten	Lemna gibba	> 1	Agroscope	j.efsa.2016.4610_LoEP
Aclonifen	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.67	openfoodtox	j.efsa.2008.149r
Aclonifen	Invertebraten	Daphnia magna	0.952	openfoodtox	j.efsa.2008.149r
Aclonifen	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.006	openfoodtox	j.efsa.2008.149r
Ametoctradin	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 0.0646	openfoodtox	j.efsa.2012.2921
Ametoctradin	Invertebraten	Daphnia magna	> 0.59	openfoodtox	j.efsa.2012.2921
Ametoctradin	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	> 0.118	openfoodtox	j.efsa.2012.2921
Amisulbrom	Fische	Cyprinus carpio	0.0229	openfoodtox	j.efsa.2014.3237
Amisulbrom	Invertebraten	Daphnia magna	0.0368	openfoodtox	j.efsa.2014.3237

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Amisulbrom	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.0225	openfoodtox	j.efsa.2014.3237
Azadirachtin A+B	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.048	openfoodtox	j.efsa.2011.1858
Azadirachtin A+B	Invertebraten	Daphnia magna	1	openfoodtox	j.efsa.2011.1858
Azadirachtin A+B	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	> 5.76	openfoodtox	j.efsa.2011.1858
Azoxystrobin	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.47	openfoodtox	j.efsa.2010.1542
Azoxystrobin	Invertebraten	Macrocyclops fuscus	0.13	openfoodtox	j.efsa.2010.1542
Azoxystrobin	Primärproduzenten	Fistulifera pelliculosa	0.014	openfoodtox	j.efsa.2010.1542
Benalaxyl-M	Fische	Oncorhynchus mykiss	4.9	openfoodtox	j.efsa.2013.3148
Benalaxyl-M	Invertebraten	Daphnia magna	22.8	openfoodtox	j.efsa.2013.3148
Benalaxyl-M	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	16.5	openfoodtox	j.efsa.2013.3148
Bentazon	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 48.6	openfoodtox	j.efsa.2015.4077
Bentazon	Invertebraten	Daphnia magna	> 48.6	openfoodtox	j.efsa.2015.4077
Bentazon	Primärproduzenten	Lemna gibba	4.9	openfoodtox	j.efsa.2015.4077
Benthiavalicarb-isopropyl	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 10	openfoodtox	j.efsa.2021.6833
Benthiavalicarb-isopropyl	Invertebraten	Daphnia magna	> 10	openfoodtox	j.efsa.2021.6833
Benthiavalicarb-isopropyl	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	> 10	openfoodtox	j.efsa.2021.6833
Boscalid	Fische	Oncorhynchus mykiss	2.7	Agroscope	Boscalid_RAR_2018
Boscalid	Invertebraten	Daphnia magna	5.33	Agroscope	Boscalid_RAR_2018
Boscalid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	2.61	Agroscope	Boscalid_RAR_2018
Clethodim	Fische	Oncorhynchus mykiss	25	openfoodtox	j.efsa.2011.2417
Clethodim	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2011.2417
Clethodim	Primärproduzenten	Lemna gibba	1.9	openfoodtox	j.efsa.2011.2417
Clomazone	Fische	Oncorhynchus mykiss	15.5	openfoodtox	j.efsa.2007.109r
Clomazone	Invertebraten	Daphnia magna	12.7	Agroscope	j.efsa.2007.109r
Clomazone	Primärproduzenten	Fistulifera pelliculosa	0.136	openfoodtox	j.efsa.2007.109r
Clopyralid	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 99.9	Agroscope	j.efsa.2018.5389
Clopyralid	Invertebraten	Daphnia magna	> 99	Agroscope	j.efsa.2018.5389
Clopyralid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	30	Agroscope	j.efsa.2018.5389
Cyazofamid	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 0.107	openfoodtox	j.efsa.2020.6232
Cyazofamid	Invertebraten	Daphnia magna	> 0.107	openfoodtox	j.efsa.2020.6232
Cyazofamid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.027	openfoodtox	j.efsa.2020.6232
Cycloxydim	Fische	Oncorhynchus mykiss	220	openfoodtox	j.efsa.2010.1669

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Cycloxydim	Invertebraten	Daphnia magna	> 70.8	openfoodtox	j.efsa.2010.1669
Cycloxydim	Primärproduzenten	Dolichospermum flos-aquae	38.2	openfoodtox	j.efsa.2010.1669
Cyflufenamid	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.04	openfoodtox	j.efsa.2009.258r
Cyflufenamid	Invertebraten	Daphnia magna	> 1.73	openfoodtox	j.efsa.2009.258r
Cyflufenamid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	> 0.828	openfoodtox	j.efsa.2009.258r
Cymoxanil	Fische	Lepomis macrochirus	29	openfoodtox	j.efsa.2008.167r
Cymoxanil	Invertebraten	Daphnia magna	27	openfoodtox	j.efsa.2008.167r
Cymoxanil	Primärproduzenten	Dolichospermum flos-aquae	0.122	openfoodtox	j.efsa.2008.167r
Cyprodinil	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.35	openfoodtox	j.efsa.2006.329
Cyprodinil	Invertebraten	Daphnia magna	0.033	openfoodtox	j.efsa.2006.51r
Cyprodinil	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	1.22	openfoodtox	j.efsa.2006.329
Desmedipham	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.41	openfoodtox	j.efsa.2018.5150
Desmedipham	Invertebraten	Daphnia magna	0.35	openfoodtox	j.efsa.2018.5150
Desmedipham	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.064	openfoodtox	j.efsa.2018.5150
Dicamba	Fische	Cyprinus carpio	> 100	openfoodtox	j.efsa.2011.1965
Dicamba	Invertebraten	Daphnia magna	> 41	openfoodtox	j.efsa.2011.1965
Dicamba	Primärproduzenten	Myriophyllum spicatum	> 0.45	openfoodtox	j.efsa.2011.1965
Difenoconazole	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.1	openfoodtox	j.efsa.2011.1967
Difenoconazole	Invertebraten	Daphnia magna	0.77	openfoodtox	j.efsa.2011.1967
Difenoconazole	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	0.032	openfoodtox	j.efsa.2011.1967
Dimethenamid-P	Fische	Oncorhynchus mykiss	2.6	openfoodtox	j.efsa.2018.5211
Dimethenamid-P	Invertebraten	Daphnia magna	11	Agroscope	j.efsa.2018.5211
Dimethenamid-P	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.01443	openfoodtox	j.efsa.2018.5211
Dimethomorph	Fische	Oncorhynchus mykiss	3.4	openfoodtox	j.efsa.2006.82r
Dimethomorph	Invertebraten	Daphnia magna	> 10.6	openfoodtox	j.efsa.2006.82r
Dimethomorph	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	82.2	Agroscope	Dimethomorph_RAR_2017
Dinatriumphos-phonat	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 61.26	Agroscope	j.efsa.2013.3213
Dinatriumphos-phonat	Invertebraten	Daphnia magna	> 61.26	Agroscope	j.efsa.2013.3213
Dinatriumphos-phonat	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	7.29	Agroscope	j.efsa.2013.3213
Diquat	Fische	Oncorhynchus mykiss	6.1	openfoodtox	j.efsa.2015.4308
Diquat	Invertebraten	Daphnia magna	1.2	openfoodtox	j.efsa.2015.4308
Diquat	Primärproduzenten	Fistulifera pelliculosa	0.00059	openfoodtox	j.efsa.2015.4308

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Ethofumesate	Fische	Cyprinus carpio	10.92	Agroscope	j.efsa.2016.4374
Ethofumesate	Invertebraten	Daphnia magna	13.52	Agroscope	j.efsa.2016.4374
Ethofumesate	Primärproduzenten	Myriophyllum spicatum	0.25	Agroscope	j.efsa.2016.4376
Fenhexamid	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.34	openfoodtox	j.efsa.2014.3744
Fenhexamid	Invertebraten	Daphnia magna	105	openfoodtox	j.efsa.2014.3744
Fenhexamid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	4.31	openfoodtox	j.efsa.2014.3744
Fettsäuren (Kaliumsalze)	Fische	Oncorhynchus mykiss gairdneri	8.79	Agroscope	j.efsa.2013.3023
Fettsäuren (Kaliumsalze)	Invertebraten	Daphnia magna	10.2	Agroscope	j.efsa.2013.3023
Fettsäuren (Kaliumsalze)	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	3.8	Agroscope	j.efsa.2013.3023
Fluazifop-P-butyl	Fische	Cyprinus carpio	1.31	openfoodtox	j.efsa.2012.2945
Fluazifop-P-butyl	Invertebraten	Daphnia magna	> 0.62	openfoodtox	j.efsa.2012.2945
Fluazifop-P-butyl	Primärproduzenten	Fistulifera pelliculosa	0.51	openfoodtox	j.efsa.2012.2945
Fluazinam	Fische	Lepomis macrochirus	0.055	openfoodtox	j.efsa.2008.137r
Fluazinam	Invertebraten	Daphnia magna	0.22	openfoodtox	j.efsa.2008.137r
Fluazinam	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.16	openfoodtox	j.efsa.2008.137r
Fludioxonil	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.23	openfoodtox	j.efsa.2007.110r
Fludioxonil	Invertebraten	Daphnia magna	0.4	openfoodtox	j.efsa.2007.110r
Fludioxonil	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.024	openfoodtox	j.efsa.2007.110r
Flufenacet	Fische	Lepomis macrochirus	2.13	Agroscope	j.efsa.2024.8997
Flufenacet	Invertebraten	Hyalella azteca	2.45	Agroscope	j.efsa.2024.8997
Flufenacet	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	0.675	Agroscope	j.efsa.2024.8997
Fluroxypyr	Fische	Lepomis macrochirus	14.3	openfoodtox	j.efsa.2011.2091
Fluroxypyr	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2011.2091
Fluroxypyr	Primärproduzenten	Lemna gibba	12.3	openfoodtox	j.efsa.2011.2091
Fluxapyroxad	Fische	Cyprinus carpio	0.29	Agroscope	j.efsa.2012.2522
Fluxapyroxad	Invertebraten	Daphnia magna	6.78	Agroscope	j.efsa.2012.2522
Fluxapyroxad	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.7	Agroscope	j.efsa.2012.2522
Folpet	Fische	Salmo trutta	0.098	Agroscope	j.efsa.2009.297r
Folpet	Invertebraten	Daphnia magna	0.68	Agroscope	j.efsa.2009.297r
Folpet	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	> 10	Agroscope	j.efsa.2009.297r
Foramsulfuron	Fische	Lepomis macrochirus	> 100	openfoodtox	j.efsa.2016.4421
Foramsulfuron	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2016.4421

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Foramsulfuron	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.00101	openfoodtox	j.efsa.2016.4421
Fosetyl	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 60	openfoodtox	j.efsa.2006.54
Fosetyl	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2018.5307
Fosetyl	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	5.9	openfoodtox	j.efsa.2006.54
Imazamox	Fische	Cyprinodon variegatus	> 97	openfoodtox	j.efsa.2016.4432
Imazamox	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2016.4432
Imazamox	Primärproduzenten	Aquatic plants group	0.022	openfoodtox	j.efsa.2016.4432
Iodosulfuron-methyl-Natrium	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.684	openfoodtox	j.efsa.2016.4453
Iodosulfuron-methyl-Natrium	Invertebraten	Daphnia magna	0.732	openfoodtox	j.efsa.2016.4453
Iodosulfuron-methyl-Natrium	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.00074	openfoodtox	j.efsa.2016.4453
Kalium-phosphonat	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 28.6	openfoodtox	j.efsa.2006.54
Kalium-phosphonat	Invertebraten	Daphnia magna	> 29.7	openfoodtox	j.efsa.2006.54
Kalium-phosphonat	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	7.29	openfoodtox	j.efsa.2013.3213
Kupfer (als Hydroxid)	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.0165	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Hydroxid)	Invertebraten	Daphnia magna	0.0308	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Hydroxid)	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.02229	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Kalkpräparat)	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.052	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Kalkpräparat)	Invertebraten	Daphnia magna	1.87	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Kalkpräparat)	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	11.55	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Oxychlorid)	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.78	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Oxychlorid)	Invertebraten	Daphnia magna	0.29	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Oxychlorid)	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	49.81	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Oxysulfat)	Fische	Oncorhynchus mykiss	13.18	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Oxysulfat)	Invertebraten	Daphnia magna	0.0167	Agroscope	j.efsa.2018.5152_LoEP
Kupfer (als Oxysulfat)	Primärproduzenten	Pseudokirchneriella subcapitata	12.3	PPDB	PPDB 2025-04-01
Lenacil	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 2	openfoodtox	j.efsa.2009.1326
Lenacil	Invertebraten	Daphnia magna	> 8.4	openfoodtox	j.efsa.2009.1326
Lenacil	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.0077	openfoodtox	j.efsa.2009.1326
Mandipropamid	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 2.9	Agroscope	j.efsa.2012.2935
Mandipropamid	Invertebraten	Daphnia magna	7.1	Agroscope	j.efsa.2012.2935

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Mandipropamid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	3.7	Agroscope	j.efsa.2012.2935
Mesotrione	Fische	Lepomis macrochirus	> 120	openfoodtox	j.efsa.2016.4419
Mesotrione	Invertebraten	Daphnia pulex	> 622	openfoodtox	j.efsa.2016.4419
Mesotrione	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.0077	openfoodtox	j.efsa.2016.4419
Metalaxyl-M	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 100	openfoodtox	j.efsa.2015.3999
Metalaxyl-M	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2015.3999
Metalaxyl-M	Primärproduzenten	Scenedesmus quadricauda	19.95	openfoodtox	j.efsa.2015.3999
Metamitron	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 190	openfoodtox	j.efsa.2008.185r
Metamitron	Invertebraten	Daphnia magna	5.7	openfoodtox	j.efsa.2008.185r
Metamitron	Primärproduzenten	Lemna minor	0.38	openfoodtox	j.efsa.2008.185r
Metazachlor	Fische	Oncorhynchus mykiss	8.5	openfoodtox	j.efsa.2008.145r
Metazachlor	Invertebraten	Daphnia magna	33	openfoodtox	j.efsa.2008.145r
Metazachlor	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.0023	openfoodtox	j.efsa.2008.145r
Metrafenone	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 0.82	openfoodtox	j.efsa.2006.58r
Metrafenone	Invertebraten	Daphnia magna	> 0.92	openfoodtox	j.efsa.2006.58r
Metrafenone	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.71	openfoodtox	j.efsa.2006.58r
Metribuzin	Fische	Oncorhynchus mykiss	74.6	openfoodtox	j.efsa.2006.88r
Metribuzin	Invertebraten	Daphnia magna	49	openfoodtox	j.efsa.2006.88r
Metribuzin	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.0079	openfoodtox	j.efsa.2006.88r
Myclobutanil	Fische	Oncorhynchus mykiss	2	openfoodtox	j.efsa.2010.1682
Myclobutanil	Invertebraten	Daphnia magna	17	openfoodtox	j.efsa.2010.1682
Myclobutanil	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	1.1	openfoodtox	j.efsa.2010.1682
Napropamide	Fische	Oncorhynchus mykiss	6.6	openfoodtox	j.efsa.2010.1565
Napropamide	Invertebraten	Daphnia magna	5.4	openfoodtox	j.efsa.2010.1565
Napropamide	Primärproduzenten	Lemna minor	0.237	openfoodtox	j.efsa.2010.1565
Nicosulfuron	Fische	Oncorhynchus mykiss	65.7	openfoodtox	j.efsa.2008.120r
Nicosulfuron	Invertebraten	Daphnia magna	90	openfoodtox	j.efsa.2008.120r
Nicosulfuron	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.0017	openfoodtox	j.efsa.2008.120r
Pelargonsäure	Fische	Oncorhynchus mykiss	129	openfoodtox	j.efsa.2021.6813
Pelargonsäure	Invertebraten	Daphnia magna	50.05	openfoodtox	j.efsa.2021.6813
Pelargonsäure	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	21.9	openfoodtox	j.efsa.2021.6813
Penconazole	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.13	openfoodtox	j.efsa.2008.175r

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Penconazole	Invertebraten	Daphnia magna	6.75	openfoodtox	j.efsa.2008.175r
Penconazole	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.096	openfoodtox	j.efsa.2008.175r
Pendimethalin	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.196	openfoodtox	j.efsa.2016.4420
Pendimethalin	Invertebraten	Daphnia magna	0.147	openfoodtox	j.efsa.2016.4420
Pendimethalin	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.0038	openfoodtox	j.efsa.2016.4420
Pethoxamid	Fische	Oncorhynchus mykiss	2.19	openfoodtox	j.efsa.2017.4981
Pethoxamid	Invertebraten	Daphnia magna	12.2	openfoodtox	j.efsa.2017.4981
Pethoxamid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.004	openfoodtox	j.efsa.2017.4981
Phenmedipham	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.84	openfoodtox	j.efsa.2018.5151
Phenmedipham	Invertebraten	Daphnia magna	2.033	openfoodtox	j.efsa.2018.5151
Phenmedipham	Primärproduzenten	Myriophyllum spicatum	0.0705	openfoodtox	j.efsa.2018.5151
Propyzamide	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 4.7	openfoodtox	j.efsa.2016.4554
Propyzamide	Invertebraten	Daphnia magna	> 4.6	openfoodtox	j.efsa.2016.4554
Propyzamide	Primärproduzenten	Myriophyllum spicatum	0.021	openfoodtox	j.efsa.2016.4554
Proquinazid	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.349	openfoodtox	j.efsa.2009.1350
Proquinazid	Invertebraten	Daphnia magna	0.287	openfoodtox	j.efsa.2009.1350
Proquinazid	Primärproduzenten	Fistulifera pelliculosa	0.25	openfoodtox	j.efsa.2009.1350
Prosulfocarb	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.84	openfoodtox	j.efsa.2007.111r
Prosulfocarb	Invertebraten	Daphnia magna	0.51	openfoodtox	j.efsa.2007.111r
Prosulfocarb	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.049	openfoodtox	j.efsa.2007.111r
Pyraflufen-ethyl	Fische	Lepomis macrochirus	> 0.1	openfoodtox	j.efsa.2015.4001
Pyraflufen-ethyl	Invertebraten	Daphnia magna	> 0.1	openfoodtox	j.efsa.2015.4001
Pyraflufen-ethyl	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.00065	openfoodtox	j.efsa.2015.4001
Pyridate	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.19	openfoodtox	j.efsa.2014.3801
Pyridate	Invertebraten	Daphnia magna	0.49	openfoodtox	j.efsa.2014.3801
Pyridate	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.82	openfoodtox	j.efsa.2014.3801
Quinmerac	Fische	Oncorhynchus mykiss	86.8	openfoodtox	j.efsa.2010.1523
Quinmerac	Invertebraten	Daphnia magna	> 100	openfoodtox	j.efsa.2010.1523
Quinmerac	Primärproduzenten	Lemna gibba	96	openfoodtox	j.efsa.2010.1523
S-Metolachlor	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.23	Agroscope	S-Metolachlor_RAR_2018
S-Metolachlor	Invertebraten	Daphnia magna	11.24	Agroscope	S-Metolachlor_RAR_2018
S-Metolachlor	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.056	Agroscope	S-Metolachlor_RAR_2018

Wirkstoff	Organismengruppe	Art	Endpunkt [mg/L]	Herkunft	Quelle
Schwefel	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 80	Agroscope	Sulphur_RAR_2008
Schwefel	Invertebraten	Daphnia magna	> 40.4	Agroscope	Sulphur_RAR_2022
Schwefel	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	> 80.8	Agroscope	Sulphur_RAR_2008
Spinosad	Fische	Cyprinus carpio	4	Agroscope	j.efsa.2018.5252_LoEP
Spinosad	Invertebraten	Chironomus riparius	0.0057	Agroscope	j.efsa.2018.5252_LoEP
Spinosad	Primärproduzenten	Fistulifera pelliculosa	0.3	Agroscope	j.efsa.2018.5252_LoEP
Spirotetramat	Fische	Cyprinodon variegatus	1.96	openfoodtox	j.efsa.2013.3243
Spirotetramat	Invertebraten	Chironomus riparius	1.3	openfoodtox	j.efsa.2013.3243
Spirotetramat	Primärproduzenten	Marine centric diatom	0.36	openfoodtox	j.efsa.2013.3243
Spiroxamine	Fische	Danio rerio	2.41	openfoodtox	j.efsa.2010.1719
Spiroxamine	Invertebraten	Daphnia magna	3	openfoodtox	j.efsa.2010.1719
Spiroxamine	Primärproduzenten	Marine centric diatom	0.0013	openfoodtox	j.efsa.2010.1719
Tembotrione	Fische	Oncorhynchus mykiss	1.37	Agroscope	j.efsa.2013.3131
Tembotrione	Invertebraten	Chironomus riparius	12.5	Agroscope	j.efsa.2013.3131
Tembotrione	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.75	Agroscope	j.efsa.2013.3131
Terbuthylazine	Fische	Oncorhynchus mykiss	2.2	openfoodtox	j.efsa.2011.1969
Terbuthylazine	Invertebraten	Daphnia magna	21.2	PPDB	PPDB 2025-04-01
Terbuthylazine	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.012	openfoodtox	j.efsa.2011.1969
Thiencarbazone	Fische	Oncorhynchus mykiss	> 104	openfoodtox	j.efsa.2013.3270
Thiencarbazone	Invertebraten	Daphnia magna	> 98.6	openfoodtox	j.efsa.2013.3270
Thiencarbazone	Primärproduzenten	Lemna gibba	8e-04	openfoodtox	j.efsa.2013.3270
Trifloxystrobin	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.015	Agroscope	j.efsa.2017.4989_LoEP
Trifloxystrobin	Invertebraten	Daphnia magna	0.0052	Agroscope	j.efsa.2017.4989_LoEP
Trifloxystrobin	Primärproduzenten	Desmodesmus subspicatus	0.0174	Agroscope	j.efsa.2017.4989_LoEP
Triflusulfuron-methyl	Fische	Oncorhynchus mykiss	730	openfoodtox	j.efsa.2022.7303
Triflusulfuron-methyl	Invertebraten	Daphnia magna	> 960	openfoodtox	j.efsa.2022.7303
Triflusulfuron-methyl	Primärproduzenten	Lemna gibba	0.00282	openfoodtox	j.efsa.2009.195r
Zoxamid	Fische	Oncorhynchus mykiss	0.16	openfoodtox	j.efsa.2017.4980
Zoxamid	Invertebraten	Daphnia magna	> 0.69	Agroscope	j.efsa.2017.4980
Zoxamid	Primärproduzenten	Selenastrum capricornutum	0.0582	openfoodtox	j.efsa.2017.4980

6 Anhang 3: Ökonomie – Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz

6.1 Zusammenfassung

Das Projekt PFLOPF (Pflanzenschutz Optimierung mit Precision Farming) hat zum Ziel, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) durch den Einsatz von Precision Farming Technologien zu reduzieren. Am Projekt nahmen zum Untersuchungszeitpunkt etwa 60 Betriebe aus den Kantonen Zürich, Thurgau und Aargau teil. Jeder teilnehmende Betrieb konnte dabei aus sieben Massnahmen auswählen, die er umsetzen wollte. Die Massnahmen umfassen Prognose- und Monitoringsysteme zum Vorhersagen des Infektions- und Befallsrisikos sowie des tatsächlichen Befalls, satellitenbasierte Lenksysteme, satellitengesteuerte Pflanzenschutzgeräte mit Teilbreiten- oder Einzeldüsenschaltungen, die bewuchsspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit Sensortechnik (bewuchsspezifische Ausbringung), die sensorgesteuerte alternative Unkrautregulierung im Acker- und Gemüsebau (sensorgesteuertes Hacken), die roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obstbau (roboterbasiertes Mulchen) und Drohnen im Rebbau.

In diesem Bericht wird die Wirtschaftlichkeit dieser Massnahmen des Projektes PFLOPF untersucht. Dazu wurde für die Massnahmen, zu denen verlässliche Daten vorlagen, ein Verfahrensvergleich durchgeführt. Der Einsatz von Precision Farming Technologien ist mit Investitionen verbunden. Diese Investitionen erfolgen teils mit dem Ersatz bestehender Maschinen, z. B. beim Kauf eines neuen Traktors oder einer Spritze. Teilweise werden neue Maschinen zusätzlich erworben. Die Investitionskosten können sich je nach Massnahmen stark unterscheiden. Der Einsatz von Precision Farming Technologien kann zu veränderten Anbauverfahren führen und damit sowohl die Direkt- als auch die Arbeitserledigungskosten (Arbeits- und Maschinenkosten) verändern.

Lenksysteme und die automatische Teilbreitenschaltung ermöglichen im Ackerbau eine Einsparung an Direktkosten (PSM, Saatgut und Düngemittel) im einstelligen Prozentbereich und der Traktor- und Arbeitskosten. Für durchschnittlich grosse Ackerbaubetriebe lohnt sich die Investition in diese Technologien, bei der Teilbreitenschaltung unter Berücksichtigung qualitativer Aspekte der Arbeitsentlastung. Mit einer höheren Auslastung auf sehr grossen Betrieben steigt die Attraktivität dieser Technologien noch an. Wenn diese Technologien bei einer geringeren Auslastung angeschafft werden, steht für die Landwirte primär die Arbeitserleichterung bzw. der erhöhte Arbeitskomfort im Vordergrund.

Spot-Spraying wurde für den Einsatz im Gemüsebau betrachtet. Der Einsatz dieser Technologie ermöglicht hohe Einsparungen an Pflanzenschutzmitteln, allerdings sind auch die Anschaffungskosten sehr viel höher als bei einer konventionellen Spritze. Selbst im überbetrieblichen Einsatz ist der Einsatz der Präzisionsspritzen kostenintensiver als die konventionelle Spritze.

Im Ackerbau ist das Hacken zwischen den Reihen kombiniert mit einer Bandspritzung wirtschaftlich, wenn Beiträge zum Herbizidverzicht bezogen werden können. Die Technologie zum Hacken in der Reihe ist gegenwärtig noch sehr teuer. Der Einsatz der Hacke ist an gewisse Bodenbedingungen geknüpft und mit Terminkosten verbunden. Ausserdem steigt mit dem Hacken der Arbeitszeitbedarf.

Der Einsatz von Drohnen im Weinbau bietet sich insbesondere in schwierig zu befahrenen Lagen an. In der Praxis ist der Einsatz der Drohne zudem nur begrenzt möglich. So muss zum Fliegen einer Drohne eine Prüfung abgelegt werden. Wird ein Lohnunternehmen beauftragt, geht Flexibilität verloren, da häufig viele Landwirte zur gleichen Zeit eine Drohne benötigen. Schliesslich kann die Drohne Blätter und Trauben nicht so gut benetzen wie eine Gebläsespritze. In steilen oder Terrassenlagen kann die Drohne wirtschaftlich interessant sein.

Die betrachteten Technologien ermöglichen teils grosse Einsparungen an PSM. Allerdings sind in der kleinstrukturierten Schweizer Landwirtschaft die Möglichkeiten zur Auslastung der teils sehr teuren Maschinen herausfordernd. Die im Vergleich mit dem Ausland höheren Lohnkosten in der Schweizer Landwirtschaft können den Einsatz arbeitssparender Precision Farming Technologien begünstigen. Anstrengungen zum Verzicht auf PSM und finanzielle Anreize zum Einsatz dieser Technologien können den Einsatz weiter antreiben. Ausserdem ist zu erwarten, dass mit zunehmender technologischer Entwicklung und Verbreitung der Technologien die Kosten künftig abnehmen könnten.

6.2 Einleitung

Der Nationale Aktionsplan Pflanzenschutz zielt darauf ab, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu optimieren und zu reduzieren. Precision Farming Technologien wie satelliten- und sensorgesteuerte Maschinen und individuelle Pflanzenschutz-Prognosen könnten dabei helfen. Allerdings werden diese Technologien in der Praxis kaum genutzt, da es organisatorische und wirtschaftliche Hürden gibt.

Um diese Hürden besser zu verstehen, läuft in den Kantonen Aargau, Thurgau und Zürich von 2019 bis 2026 das Projekt PFLOPF (Pflanzenschutzoptimierung mit Precision Farming). Zum Untersuchungszeitpunkt nehmen etwa 60 Betriebe in den Betriebszweigen Acker-, Gemüse-, Obst- und Rebbau am Projekt teil und setzen sieben verschiedene Precision Farming Massnahmen um. Die Massnahmen umfassen Prognose- und Monitoringsysteme, Lenksysteme, Teilbreitenschaltungen, Spot-Spraying, Präzisionshacken, Mulchroboter und Drohnen.

Ein wichtiger Aspekt dieser Massnahmen sind die Praxistauglichkeit und die Wirtschaftlichkeit, die als Teil des Projektes ebenfalls untersucht werden. Deshalb wird anhand der Daten, die auf den verschiedenen Betrieben erhoben wurden, ein Verfahrensvergleich durchgeführt, der die entstehenden Kosten und den Nutzen durch den Einsatz von Precision Farming Technologien vergleicht.

6.3 Daten und Methoden

6.3.1 Literaturanalyse

Um eine Übersicht über den aktuellen Wissensstand zum Thema «Wirtschaftlichkeit von Precision Farming» zu erhalten, wurde zuerst eine Literaturanalyse durchgeführt. Die erste Hälfte der Literatursuche war eine systematische Literaturanalyse, für die ein Suchstring konzipiert wurde. Dieser Suchstring wurde bei der Literaturdatenbank Scopus eingegeben. Die meisten der gefundenen Artikel konnten für die Diskussion dieses Berichts nicht unmittelbar verwendet werden, da entweder keine konkreten Zahlen genannt oder landwirtschaftliche Betriebe aus anderen Ländern untersucht wurden. Für die Analyse wurde entschieden, Publikationen aus Nachbarländern der Schweiz sowie Schweizer Veröffentlichungen miteinzubeziehen. Länder wie Deutschland weisen zwar andere Betriebsstrukturen auf als die Schweiz, deutsche Betriebe sind im Durchschnitt zum Beispiel grösser, aber der Wissensstand beider Länder ist in etwa vergleichbar.

Die zweite Hälfte der Literatursuche wurde mit Google durchgeführt, um auch praxisrelevante Schweizer Publikationen zu erfassen. Da es sich bei Google um eine semantische Suchmaschine handelt (Singhal, 2012), spielt der genaue Wortlaut nur noch eine untergeordnete Rolle und auf die Definition eines Suchstrings wurde daher verzichtet.

Die während der Literatursuche gefundenen Quellen wurden im Bericht verwendet, um die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse in bestehende Literatur einzuordnen und die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen. So wurden die Annahmen zur Arbeitsgeschwindigkeit und zum Einsparpotential an PSM verglichen. Die Mehrkosten oder die finanzielle Einsparung wurde in Relation zu den Direktkosten betrachtet. Ein Vergleich in absoluten Zahlen ist nicht möglich, da die Artikel aus unterschiedlichen Ländern und aus unterschiedlichen Jahren stammen und die verwendeten Währungen zum Zeitpunkt der Studiendurchführung einen unterschiedlichen Wert besassen.

6.3.2 Datenerhebung

Um Informationen über die Praxiserfahrungen sowie Daten für die Wirtschaftlichkeitsanalyse zu sammeln, wurden Landwirte, die am Projekt PFLOPF teilgenommen haben, im Herbst 2024 in einem persönlichen Gespräch zu ihren Erfahrungen mit den angewendeten Massnahmen befragt. Es wurden möglichst viele Projektbetriebe befragt, die eine Massnahme angewendet haben, die nur selten verwendet wurde, wie Spot-Spraying oder Drohnen. Auch Lohnunternehmen, die am Projekt teilgenommen haben, wurden befragt, da sie aufgrund der höheren Auslastung der Maschinen andere Blickwinkel auf die Vor- und Nachteile der Maschine hatten. Der Fragenkatalog (siehe Kapitel 6.18.1) wurde auf die spezifischen Massnahmen abgestimmt.

Tabelle 10 zeigt das Verhältnis von Betrieben, die zu ihren Erfahrungen mit den Massnahmen befragt wurden, zu den Betrieben, die die Massnahme umgesetzt haben. Da für die Massnahme 1 (Prognose- und Monitoringsysteme) keine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt wurde, wurden diesbezüglich verhältnismässig wenige Betriebe

befragt. Bei Massnahme 2 (automatische Lenksysteme) wurden 15 Betriebe befragt. Massnahme 6 (Mulchroboter) konnte nur testweise durchgeführt werden und kam nicht regulär auf Betrieben zum Einsatz.

Tabelle 10: Verhältnis zwischen den Betrieben, die persönlich zu ihren Erfahrungen mit den Massnahmen befragt wurden und allen Betrieben, die Zahlungen für die Anwendung dieser Massnahme erhalten haben.

	Anzahl befragte Betriebe	An Massnahme teilgenommene Betriebe
M1 – Prognose- und Monitoringsysteme	15	57
M2 – Lenksysteme	15	36
M3 – Teilbreitenschaltungen	11	33
M4 – Bewuchsspezifische Ausbringung	5	6
M5 – Sensorgesteuertes Hacken	11	19
M6 – Roboterbasiertes Mulchen	0	1
M7 – Drohnen	5	5

6.3.3 Verfahrensvergleich

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde ein Verfahrensvergleich angewandt (Dabbert und Braun, 2012; Heitkämper et al., 2023; Reisch, 1976). Als Referenzverfahren wird jeweils eine Maschinenkombination gewählt, die häufig verwendet wird oder die im Deckungsbeitragskatalog (Vonnez et al., 2024) angegeben wurde. Die Kosten der Verfahren werden dann jeweils für den durchschnittlichen Ackerbaubetrieb (Schmid et al., 2024) mit einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von 40 ha berechnet. Von den 40 ha landwirtschaftliche Nutzfläche sind 32 ha offene Ackerfläche. Brotgetreide macht mit 11 ha einen Drittel dieser Ackerfläche aus, gefolgt von Ölsaaten mit 5 ha. Bei den Massnahmen M4 (bewuchsspezifische Ausbringung), M5 (sensorgesteuertes Hacken) und 7 (Drohnen im Rebbau) wurde die Precision Farming Technologie nicht auf dem ganzen Betrieb eingesetzt oder es liegen Messungen des PSM-Einsparpotentials nur für einzelne Kulturen vor. Deshalb wurden bei diesen Massnahmen die Kosten für die Bewirtschaftung von einem Hektar einer Kultur mit oder ohne Precision Farming berechnet.

Die Umsetzung einer Massnahme kann die Maschinen- und Arbeitskosten, zusammen bilden diese zwei Positionen die Arbeitserledigungskosten, sowie die Direktkosten beeinflussen. Die betrieblichen Maschinenkosten steigen durch den Kauf einer Precision Farming Technologie in der Regel an, der Arbeitszeitbedarf kann sowohl zu- als auch abnehmen. Die Direktkosten sinken bei den betrachteten Massnahmen infolge der Einsparung von Pflanzenschutzmitteln. Für einen Landwirt, der auf seinem Betrieb tätig ist, wird von einem Stundenlohn von 31 Franken ausgegangen, wie er auch im aktuellen Kostenkatalog verwendet wird (Bütler et al., 2024; Gazzarin und Lips, 2018).

Die Maschinenkosten wurden jeweils mithilfe von TractoScope (Bütler et al., 2024; Gazzarin und Lips, 2018), einem Tool von Agroscope, berechnet. Das ursprünglich für die Kalkulation vorgesehene Webtool PAMCoBa (PAMCoBA - Precision agriculture– Methodology for Cost Benefit Analysis, https://tool.pamcoba.eu/) wurde für die Berechnungen nicht verwendet, da nicht alle im Projekt angewandten Massnahmen als Option zur Berechnung zur Verfügung standen und das in der Schweiz etablierte TractoScope als geeigneter erachtet wurde. Bei PAMCoBa sind die gleichen Berechnungen möglich, jedoch ist das Nachvollziehen der Berechnungen schwieriger. TractoScope verwendet die Werte aus dem Kostenkatalog, die auf dem Durchschnitt verschiedener Produkte eines Maschinentyps basieren.

Ein grosser Einflussfaktor auf die Maschinenkosten ist der Anschaffungspreis. Es wurde eine Befragung mit Landwirten, die die Technologie verwendet haben, durchgeführt. Die Werte in TractoScope wurden mit den bei den Landwirten erhobenen Daten zum Anschaffungspreis, der Auslastung, den Reparaturkosten und der Arbeitsleistung abgeglichen. Standardmässig werden die Daten aus TractoScope verwendet, die im Falle markanter Abweichungen der erhobenen Daten angepasst wurden.

Neben dem Anschaffungspreis hat auch die Auslastung der Maschine einen Einfluss auf die Maschinenkosten. Mit zunehmender Auslastung sinken die Fixkosten je Arbeitseinheit. Die Auslastung basiert für die Massnahmen 4, 5 und 7 auf den Angaben aus dem Kostenkatalog und wurde punktuell angepasst. Für die gesamtbetrieblich

wirksamen Massnahmen 2 und 3 wurde die Auslastung anhand eines Beispiel-Ackerbaubetriebes und der gemäss dessen Struktur der Ackerkulturen durchschnittlich nötigen Anzahl an Überfahrten berechnet.

Der Risikozuschlag in TractoScope wurde in der Regel nicht berücksichtigt, da dieser nur benötigt wird, wenn eine Maschine überbetrieblich eingesetzt wird (Gazzarin und Lips, 2018). Die Landwirte, die am Projekt teilgenommen haben, kaufen ihre Maschinen aber entweder selbst oder beauftragen ein Lohnunternehmen.

Die Ausgaben für die Direktkostenpositionen PSM, Saatgut und Düngemittel basieren auf aktuellen dreijährigen Mittelwerten, die von der Stichprobe Betriebsführung der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten erhoben wurden (Schmid et al., 2024). Das Einsparpotential an PSM wurde von einer anderen Arbeitsgruppe von Agroscope gemessen und übernommen.

Bei der Berechnung der Arbeitszeit wurde die Flächenleistung von TractoScope verwendet. Zudem wurden die Landwirte zu ihrer Einschätzung der Arbeitszeit befragt und Literatur konsultiert. Wichen die Angaben der Landwirte zur Arbeitszeit jedoch stark von der im Kostenkatalog angegebenen Flächenleistung ab, wurde die Flächenleistung entsprechend korrigiert.

6.3.4 Onlineumfrage

Zusätzlich zu der persönlichen Befragung wurden die Landwirte auch telefonisch und via E-Mail dazu aufgefordert, eine Onlineumfrage mit weiteren Fragen auszufüllen. Diese E-Mail wurde an alle 50 Betriebe verschickt; von 43 Betrieben liegen auswertbare Antworten vor; 7 Rückmeldungen waren entweder leer oder unvollständig. Da alle Meinungen der Landwirte erfasst werden sollten, war es wichtig, dass genügend Landwirte die Umfrage vollständig ausfüllen. Insbesondere war es wichtig, Antworten aus allen Betriebszweigen und allen Kantonen zu erhalten (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Kombinationen der Kantone und Betriebszweige, die am Projekt teilgenommen haben.

	Aargau	Thurgau	Zürich
Ackerbau	10	8	10
Acker und Gemüse	2	1	1
Gemüsebau	3	2	1
Obstbau	0	4	3
Obst und Rebbau	0	1	0
Rebbau	3	0	1

Zu Beginn der Onlineumfrage wurden Fragen zum Alter des Landwirts, der Anzahl Arbeitskräfte auf dem Betrieb und der landwirtschaftlichen Nutzfläche des Betriebs gestellt. Danach folgten Fragen zur Einstellung der Landwirte zu Precision Farming allgemein und wie sie sich die Zukunft der im Projekt angewendeten Massnahmen vorstellten. Es bestand die Möglichkeit, Vorteile, Probleme und Verbesserungsvorschläge zu den einzelnen Massnahmen zu erläutern. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Erfassung der Nutzungshäufigkeit und -dauer, um die praktische Relevanz der verschiedenen Massnahmen zu bewerten. In Kapitel 6.18.2) ist eine verkürzte Version des Fragenkataloges aufgeführt.

6.4 Massnahmenübersicht

In Tabelle 12 ist dargestellt, wie viele Betriebe an jeder Massnahme teilgenommen und welche Teilnahme geplant war. Die Teilnehmerziele wurden grösstenteils erreicht, insbesondere sensorgesteuertes Hacken wurde weniger oft als geplant umgesetzt. Ebenfalls in der Tabelle ersichtlich sind die Ziele zur PSM-Reduktion, die zu Beginn des Projekts festgelegt worden sind.

Tabelle 12: Übersicht über die im Projekt angewendeten Massnahmen.

Massnahme	Betriebe Ist (Soll)	Zielsetzung PSM-Reduktion
M1 Prognose- und Monitoring-Systeme	58 (60)	15 % weniger Fungizid- und Insektizidbehandlungen
M2 Lenksysteme	36 (30)	-3 % PSM Ausbringmenge im Vergleich zu Flächen ohne Minimierung der Fahrgassenüberlappung
M3 Teilbreitenschaltung	33 (25)	-2 % PSM-Ausbringmenge im Vergleich zu Flächen ohne Minimierung der Spritzüberlappungen
M4 Bewuchsspezifische Ausbringung	6	-50 % PSM-Ausbringmenge im Vergleich zu ganzflächiger Applikation
M5 Sensorgesteuertes Hacken	19 (45)	-70 % Herbizid-Anwendungen im Vergleich zu herkömmlichen, mit PSM behandelten Flächen
M6 Roboterbasiertes Mulchen	1 (3)	-70 % Herbizid-Anwendungen im Vergleich zu herkömmlichem Herbizideinsatz
M7 Drohnen	5 (10)	-30 % PSM-Ausbringmenge im Vergleich zu herkömmlicher Applikation

Standortspezifische Prognosedaten und Behandlungsempfehlungen durch Sensoren und Kommunikationssysteme (Prognose- und Monitoringsysteme)

Diese Massnahme umfasst alle Systeme und Technologien, die die Landwirte bei der Entscheidung unterstützen, ob und falls ja, wann gespritzt werden soll. Es stehen Tools zur Prognose der Krankheiten und Schädlinge, zur Überwachung der Schädlinge und zum Messen des Wetters zur Verfügung. Die verwendeten Prognosemodelle unterscheiden sich je nach Betriebszweig und auch die Funktionsweise unterschiedet sich je nach Modell. Eine Übersicht über die verwendeten Prognosemodelle findet sich in Tabelle 13.

Im Ackerbau verwendeten die Landwirte digitale Gelbschalen zur Überwachung des Schädlingsdrucks im Raps. Mithilfe einer Kamera und einer App wird dem Landwirt in Echtzeit übermittelt, wie stark das Auftreten in seinem Rapsfeld gerade ist. Das kann zu einer Arbeitserleichterung führen, da der Landwirt nun eine Unterstützung bei der Kulturbeobachtung hat. Der Landwirt sollte aber weiterhin regelmässig das Feld in Person begutachten, da der Algorithmus der digitalen Gelbschalen die Rapsschädlinge noch nicht genügend zuverlässig unterscheiden kann.

Wetterstationen liefern dem Landwirt ein Bild über verschiedene Parameter wie Luftfeuchtigkeit, Niederschlag oder Temperatur. So kann der Landwirt zum einen das Befalls- oder Infektionsrisiko besser abschätzen, zum anderen kann er so aber auch besser einschätzen, ob der aktuelle Zeitpunkt zum Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln geeignet ist. Die Wetterstationen sind zudem mit Prognosesystemplattformen von Agroscope und Drittanbietern verbunden. Durch die Berücksichtigung des aktuellen Wetters am Standort können präzisere Prognosen erstellt werden. Die Prognosesysteme lassen sich mit einem Nutzerinterface wie einer Website oder einer App benutzen. Aus den Wetterinformationen werden Prognoseinformationen berechnet und Empfehlungen zum optimalen Zeitpunkt der Pflanzenschutzmittelanwendung gegeben.

Tabelle 13: Übersicht über die in den verschiedenen Betriebszweigen verwendeten Systeme.

Betriebszweig	Prognose	Monitoring	Wetterstationen
Ackerbau	Cercbet (Cercospora / Blattflecken Zuckerrüben) Septri (Septoria / Blattdürre Weizen) PhyotPRE (Phytophtora / Kräutfäule Kartoffeln) Fusaprog (Fusarienbefall Getreide)	Digitale Gelbschalen zur Überwachung von Schädlingen im Raps	Wetterstationen mit Sensorik
Gemüsebau		Millioncast (Krankheitsmodell, Falscher Mehltau Zwiebeln)	Wetterstationen mit Sensorik
Obstbau	Sopra (Schädlingsprognose Obstbau) RIMpro (Schädlings- und Krankheitsprognose Obstbau) Feuerbrand		Wetterstationen mit Sensorik
Rebbau	Falscher Mehltau Echter Mehltau Schwarzfäule Traubenwickler Kräuselmilbe Schwarzholz		Wetterstationen mit Sensorik

Reduktion der Fahrgassenüberlappung mit GPS-Lenksystemen im Acker- und Gemüsebau

Für ein Lenksystem wird ein GPS-Empfänger benötigt, der auf dem Dach des Traktors installiert wird. Des Weiteren muss in die Steuerung des Traktors eingegriffen werden. Bei einem integrierten Lenksystems ist diese Steuerung schon beim Kauf des Traktors mit dabei und von aussen nicht mehr sichtbar. Rüstet man den Traktor hingegen nach, ist oft ein Rad sichtbar, dass das bisherige Lenkrad nun steuert. 36 der 50 Betriebe, die am Projekt PFLOPF teilnehmen, verwenden ein automatisches Lenksystem.

Reduktion der Überlappung in Randzonen nicht rechteckiger Felder durch GPS-gesteuerte Pflanzenschutzgeräte (automatische Teilbreitenschaltung)

Durch eine automatische Teilbreitenschaltung sollen Überlappungen beim Spritzen minimiert, PSM eingespart, der Fahrer entlastet und eventuell auch die Flächenleistung verbessert werden. Damit können die Ausgaben für Betriebsmittel gesenkt werden. Diese Technik leistet damit einen Beitrag zu einer ressourcenschonenden Bewirtschaftung. Eine automatische Teilbreitenschaltung kann man entweder in die Spritze integriert kaufen oder man rüstet eine bestehende Spritze mit einem Kit nach. Es gibt auch die Möglichkeit, statt einer Teilbreitenschaltung eine Einzeldüsenschaltung zu erwerben. Einzeldüsenschaltungen weisen eine noch höhere Genauigkeit auf, sind aber auch einiges teurer und wurden im Projekt PFLOPF nur von zwei Betrieben eingesetzt.

Bewuchsspezifische Ausbringung von PSM (Herbizide, Insektizide, Fungizide) in Flächen- und Raumkulturen

Bei dieser Massnahme muss zwischen Flächen- und Raumkulturen unterschieden werden. Flächenkulturen sind Acker- oder Gemüsekulturen, wie zum Beispiel Getreide oder Salat. Raumkulturen wachsen stärker in die Höhe, wie zum Beispiel Obstbäume oder Reben.

In Flächenkulturen ist Spot-Spraying möglich. Dabei wird das Pflanzenschutzmittel nur auf die Zielpflanzen appliziert (Herbizide auf Unkräuter, Fungizide bzw. Insektizide auf die Kulturpflanzen). Diese werden über ein Kamerasystem erkannt und die entsprechenden Düsen automatisch ein- oder ausgeschaltet. Neben der Anschaffung einer Präzisionsspritze besteht z. B. auch die Möglichkeit, eine Hacke mit bereits integrierter Kamera mit einem Spot-Spraying System zur Fungizid- und Insektizidausbringung nachzurüsten, wie es im Projekt von zwei Gemüsebetrieben umgesetzt wurde.

Für die präzisere Ausbringung von Fungiziden und Insektiziden im Obstbau gibt es Spritzen, deren Düsen mit Hilfe von einfachen Sensoren am Anfang und Ende der Reihen sowie bei Lücken durch fehlende Bäume automatisch ein- und ausgeschaltet werden. Eine Erweiterung stellt die mit vier LiDAR[2]-Sensoren ausgestattete Spritze dar, die im Rahmen des Projektes angeschafft wurde. Während der Durchfahrt wird von dieser Spritze zusätzlich das

[2] LiDAR steht für Light Detection and Ranging, eine Technologie, die Laserlicht nutzt, um präzise 3D-Karten der Umgebung zu erstellen.

Laubwandvolumen kontinuierlich erfasst und die ausgebrachte PSM-Menge entsprechend anpasst. Diese Massnahme wurde auf einem Betrieb angewendet.

Ein Betrieb nutzte im Projekt eine Punktspritze, um den Herbizideinsatz im Baumstreifen zu verringern, da das PSM lediglich direkt am Baumstamm appliziert wird. Die Steuerung der Düsen erfolgt über eine Lichtschranke, die die einzelnen Bäume erkennt. Die unbehandelten Bereiche zwischen den Bäumen wurden mit einem Fadenmäher kurzgehalten.

Sensorgesteuerte alternative Beikrautregulierung (sensorgesteuertes Hacken) in Reihenkulturen im Acker- und Gemüsebau

Bei dieser Massnahme können drei verschiedene Arten von Hackgeräten unterschieden werden. Die erste Möglichkeit besteht darin, die bestehende Hacke an einen Traktor mit satellitengesteuertem Lenksystem zu hängen. So wird eine grössere Genauigkeit beim Hacken zwischen den Reihen erzielt als beim manuellen Lenken. Vier Betriebe haben diese Art des Hackens angewendet. Die zweite Möglichkeit ist, mithilfe eines Sensors wie zum Beispiel einer Kamera zwischen den Reihen zu Hacken und somit eine grössere Genauigkeit zu erzielen. Das wurde von 16 Betrieben umgesetzt. Die dritte Möglichkeit ist das Hacken auch innerhalb der Kulturreihen, für das eine nochmals komplexere Sensorik und Aktorik nötig ist. Acht Betriebe haben das angewendet.

Roboterbasierte alternative Beikrautregulierung im Obstbau und Rebbau (roboterbasiertes Mulchen)

Für diese Massnahme wurde durch einen Betrieb testweise ein Mulchroboter eingesetzt, um das Gras in einer Obstanlage kurz zu halten, so dass weniger Herbizide verwendet werden. Der Mulchroboter war ein Vorserienmodell und die Praxistauglichkeit wurde durch den Hersteller noch optimiert.

Drohneneinsatz zur Abdriftreduktion und Ausnutzung optimaler Behandlungszeitfenster im Reb- und Obstbau

Drohnen wurden während des Projektes im Rebbau eingesetzt. Fünf Betriebe haben die Drohne angewendet, drei davon haben dafür ein Lohnunternehmen beauftragt. Zwei haben sich eine eigene Drohne gekauft und diese verwendet, um Pflanzenschutzmittel auszubringen. Drohnen werden vor allem in steilen Lagen verwendet. In Steillagen ist bei feuchten Bedingungen die Befahrbarkeit eingeschränkt und es besteht grundsätzlich ein höheres Unfallrisiko. An Stellen, die so steil sind, dass ein Befahren mit dem Traktor nicht möglich ist, ersetzt die Drohne das Befahren mit Raupenfahrzeugen. In Terrassenlagen kann die Drohne den Einsatz von Helikoptern oder das manuelle Spritzen ersetzen. Da Drohnen in den am Projekt teilnehmenden Regionen aufgrund weniger Steillagen nur selten eingesetzt werden, haben nur 5 von 8 Projektbetrieben mit Rebbau Drohnen eingesetzt.

6.5 Prognose- und Monitoringsysteme (M1)

Für die Vorhersage des Infektions- und Befallsrisikos mithilfe von Prognose- und Monitoringsystemen wird ein Prognosemodell benötigt, das die Daten von Wetterstationen verarbeitet. Die Ergebnisse dieses Modells werden dann mit einer App oder einer Website dem Nutzer präsentiert. Wetterstationsnetzwerke werden u.a. von Agroscope und MeteoSchweiz betrieben. Im Rahmen von PFLOPF wurde ermöglicht, dass Landwirte auf ihrem Betrieb eine eigene Station aufstellen und diese mit den Prognose- und Monitoringsystemen von Agroscope und Drittanbietern koppeln können. Lokale Wetterdaten können eine präzisere Prognose ermöglichen. Das bietet vor allem in kleinparzellierten Strukturen Vorteile. Der Zugriff auf die Website oder App war für die Landwirte gratis und die Wetterstationen wurden den teilnehmenden Betrieben zur Verfügung gestellt.

Auf eine Wirtschaftlichkeitsanalyse der Prognose- und Monitoringsysteme wird verzichtet, weshalb auf Kosten und Nutzen[3] sowie Vor- und Nachteile der Systeme nur qualitativ eingegangen wird.

Ackerbau

Im Ackerbau gibt es Prognosemodelle für verschiedene Krankheiten. Neben PhytoPRE ist Fusaprog ein System, das schon länger in der Schweiz verwendet wird. Die beiden Applikationen sind im Internet gratis verfügbar, da sie vom Bund finanziert werden. Der Nutzen dieser beiden Prognosesysteme besteht darin, dass unter guten

[3] Kosten und Nutzen sind in einem weiteren Sinne zu verstehen. So können Kosten auch durch zeitlichen Aufwand wie dem Einarbeiten in und dem Beobachten von Prognosesystemen oder durch psychische Belastung infolge von Unsicherheit entstehen. Nutzen kann entsprechend durch eine Vereinfachung entstehen.

Bedingungen eine PSM-Applikation später erfolgt oder auf die Applikation verzichtet werden kann. So kann der PSM-Einsatz verringert werden und es lassen sich die Kosten (Direkt- und Arbeitserledigungskosten) einsparen, die für diese PSM-Applikation nötig gewesen wären.

Sechs der zehn antwortenden Landwirte sind sich einig, dass PhytoPRE zuverlässig, hilfreich und einfach zu benutzen ist. Die Antworten der Landwirte zu PhytoPRE weisen eine relativ geringe Streuung auf. Eine abschliessende Beurteilung, ob eine Reduktion von PSM mit diesem Prognosemodell möglich ist, kann nicht vorgenommen werden, da die Meinungen differieren. Einig sind sich die Landwirte aber, dass die PSM einfacher zum richtigen Zeitpunkt ausgebracht werden können. Die Nutzung von PhytoPRE erfolgt in einem Intervall von zwei Wochen bis einmal im Monat. Die Landwirte schätzen das Kosten-Nutzen-Verhältnis von PhytoPRE als positiv ein.

FusaProg wird von den Antwortenden als zuverlässig erachtet. Die Aspekte Benutzerfreundlichkeit, PSM-Reduktionspotential, Nützlichkeit und die Applikation zum richtigen Zeitpunkt wurden wie bei PhytoPRE entweder neutral oder leicht positiv bewertet. Die durchschnittliche Bewertung dieser Aspekte ist jedoch tiefer als bei PhytoPRE.

SEPTRI und CERCBET sind in Deutschland entwickelte und etablierte Prognosesysteme, die im Rahmen von PFLOPF eingesetzt wurden. CERCBET wurde von den befragten Landwirten insgesamt als ein zuverlässiges und hilfreiches Prognosesystem beurteilt. Aus den Rückmeldungen geht hervor, dass CERCBET hilft, PSM zum richtigen Zeitpunkt einzusetzen. Die Landwirte konsultieren das Prognosesystem alle zwei Wochen oder jede Woche. Bei der Frage, ob die Anzahl PSM-Anwendungen reduziert werden kann, sind sich die Landwirte uneinig. Vier Landwirte stimmen der Aussage, dass PSM-Anwendungen reduziert werden können, überhaupt nicht zu, fünf Betriebe stehen der Aussage neutral gegenüber und sechs Landwirte stimmen eher zu. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird neutral bewertet.

Die Benutzerfreundlichkeit und das PSM-Reduktionspotential von SEPTRI wird grösstenteils neutral bewertet. Das System wird von den sieben der 18 Landwirte alle zwei Wochen verwendet, sechs Landwirte verwenden SEPTRI seltener, vier Landwirte verwenden SEPTRI häufiger. Grund für die weniger häufige Nutzung als bei CERCBET könnte das leicht negativere Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vergleich mit der Beurteilung der anderen Systeme sein.

Eine Analyse des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von PhytoPRE und FusaPprog ergibt ein positives Ergebnis im Vergleich zu Systemen, die in der Schweiz bislang nicht etabliert sind. Ein einzelner Aspekt, der für das weniger positive Kosten-Nutzen-Verhältnis verantwortlich ist, lässt sich aus den Umfrageergebnissen nicht ausfindig machen. SEPTRI und CERCBET wurden in Deutschland entwickelt und die Landwirte trauen den Modellen möglicherweise nicht zu, dass sie auf die Schweizer Verhältnisse gut abgestimmt sind (Wenzinger, 2024, mündliche Quelle).

Zur Schädlingsüberwachung wurden im Ackerbau digitale Gelbschalen verwendet. Diese Fallen werden in ein Rapsfeld gestellt und erlauben dem Landwirt leichter, den Schweregrad des Befalls durch Schädlinge zu überwachen. Die Felder müssen aber weiterhin noch besucht werden, um die Schadschwellen beim Rapserdfloh oder dem Rapsglanzkäfer an den Pflanzen vor Ort zu prüfen. Die Kosten für die Gelbschalen sowie die Wartung wurden während des Projektes übernommen, so dass für die Landwirte keine Kosten anfielen. Einen Nutzen hatten sie durch die Arbeitszeitreduktion, denn sie konnten via App und Webcam feststellen, wie stark der Einflug der Schädlinge auf dem Feld am jeweiligen Morgen oder Nachmittag ist und wie er sich über die Zeit entwickelt. Laut der Onlinebefragung wird an den digitalen Gelbschalen die Zuverlässigkeit und die einfache Benutzung klar geschätzt. Die digitalen Gelbschalen wurden häufig verwendet, fast alle, nämlich 15 der 19 Landwirte nutzten die Gelbschalen täglich. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird als sehr positiv bewertet. Es liessen sich laut den Aussagen der Landwirte durch die Verwendung der digitalen Gelbschalen auch PSM einsparen.

Gemüsebau

Im Gemüsebau wurde hauptsächlich das Krankheitsmodell Millioncast des falschen Mehltaus verwendet. Zu diesem liegen von zwei Gemüsebauern Bewertungen und Rückmeldungen vor. Das Modell wird als geeignet beurteilt, um das Infektionsgeschehen zu rekonstruieren (Bachmann, 2020), allerdings gibt es laut den Antwortenden noch Verbesserungspotential bei der Zuverlässigkeit und der Benutzerfreundlichkeit. Das System hilft den Gemüsebauern nicht, die Anzahl der PSM-Anwendungen zu reduzieren, sondern unterstützt die Anwender bei der Entscheidung der Behandlungszeitpunkte und der verwendeten Wirkstoffe (Bachmann, 2020).

Auch die Gemüsebauern wurden in der Onlineumfrage gefragt, was sie bei Prognose- bzw. Monitoringsystemen ändern würden. Ebenso wie im Ackerbau ist die einfachere Präsentation der Ergebnisse der Aspekt, der am meisten genannt wurde. Diese Ergebnisse decken sich mit früheren Analysen in Deutschland (von Ahlefeld, 2021) Fünf der sechs befragten Landwirte stimmen dieser Aussage eher oder voll zu. Ausserdem wünschen sich fünf der sechs Gemüsebauern Push-Benachrichtigungen. Im Vergleich zum Ackerbau würde es den Gemüsebauern mehr helfen, wenn sie mehr Informationen zur Funktionsweise des Modells erhielten.

Obstbau

Mit dem Prognosemodell Sopra sind die befragten Obstbauern zufrieden, das Modell wurde von drei Antwortenden als zuverlässig und von vier als benutzerfreundlich eingestuft. Drei Befragte finden das Modell hilfreich, zwei zweifeln den Nutzen des Modells eher an. Neutral steht dieser Aussage hingegen nur ein Obstbauer gegenüber. Auch bei diesem Modell war es gemäss den Rückmeldungen nicht möglich, die Anzahl an Anwendungen zu reduzieren. Der richtige Zeitpunkt für die Applikation kann jedoch einfacher ermittelt werden. Sopra wird von drei der sechs Obstbauern alle zwei Wochen verwendet und das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird leicht positiv beurteilt.

Zwei weitere Systeme, die im Obstbau verwendet wurden, sind RIMpro und Maryblyt. Mit beiden Systemen sind die Obstbauern grundsätzlich zufrieden. RIMpro wird von drei Antwortenden wöchentlich oder täglich verwendet, Maryblyt wird mehrheitlich wöchentlich oder täglich verwendet. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis von beiden Systemen wird positiv bewertet.

In einem persönlichen Gespräch zeigte sich der befragte Nutzer zufrieden mit den Prognosesystemen. Da das Infektionsrisiko von vielen Faktoren abhängig ist, schätzt der Obstbauer, wenn ein Modell diese Parameter überwacht und eine entsprechende Empfehlung aussprechen kann.

Im Obstbau wird vor allem bemängelt, dass die Prognosen wenig zuverlässig sind und es mehr Modelle für verschiedene Kulturen geben sollte. Auch hier wären Push-Benachrichtigungen für das Handy erwünscht. Die Obstbauern sind zudem überzeugt, dass Prognosesysteme in der Zukunft an Bedeutung zunehmen werden.

Rebbau

Im Rebbau stimmen drei der fünf teilnehmenden Rebbauern der Aussage «durch zuverlässigere Prognosen des Infektionsrisikos können Prognosesysteme im Rebbau praxistauglicher gestaltet werden» voll zu. Wie in den anderen Betriebszweigen wird auch hier eine einfachere Präsentation der Ergebnisse und eine einfach zu bedienende App gewünscht. Mit den Prognosesystemen gegen den falschen und den echten Mehltau sind die Landwirte zufrieden, die Systeme sind zuverlässig und hilfreich. Die Modelle werden wöchentlich verwendet. Die Meinungen über das Kosten-Nutzen-Verhältnis gehen auseinander, grösstenteils fällt die Bewertung aber positiv aus.

Betriebszweigübergreifende Vor- und Nachteile von Prognosesystemen

Abbildung 23 zeigt die Antworten, die in der Onlinebefragung auf die Frage nach einer Verbesserung von Prognosesystemen allgemein gegeben wurden und zu deren künftiger Bedeutung. Es stimmen 34 der 46 Landwirte teilweise oder voll zu, dass die bestehenden Modelle zuverlässiger werden sollten. Zudem halten 26 Landwirte die Entwicklung weiterer Modelle für zusätzliche Kulturen für notwendig. Auch die Benutzerfreundlichkeit der App sollte laut den Landwirten erhöht werden. Dieses Problem liesse sich auch gut durch eine Umprogrammierung der App lösen. Diese Aussage kann auch als Ausdruck eines Unterstützungsbedarfs im Umgang mit den Ergebnissen der Systeme verstanden werden, welche teilweise als schwer interpretierbar empfunden werden.

Der letzte Aspekt, der in dieser Frage abgefragt wurde, war, ob die Landwirte denken, dass Prognosesysteme in Zukunft an Bedeutung zunehmen werden. Auch dieser Aussage stimmen 36 der 46 Landwirte zu, was aufzeigt, wie wichtig die Verbesserung dieser Systeme ist.

Es sind Unterschiede in den Antworten erkennbar, je nachdem, welchem Betriebszweig die antwortenden Landwirte angehören. Bei Aspekten wie der Zuverlässigkeit und der Notwendigkeit einer einfacheren Präsentation der Ergebnisse der Prognosemodelle sind sich die meisten Antwortenden über die Betriebszweige hinweg einig. Die Rebbauern haben jedoch ein geringeres Bedürfnis nach Push-Benachrichtigungen auf dem Handy. Zudem sehen sie keinen Bedarf an zusätzlichen Modellen für weitere Krankheiten.

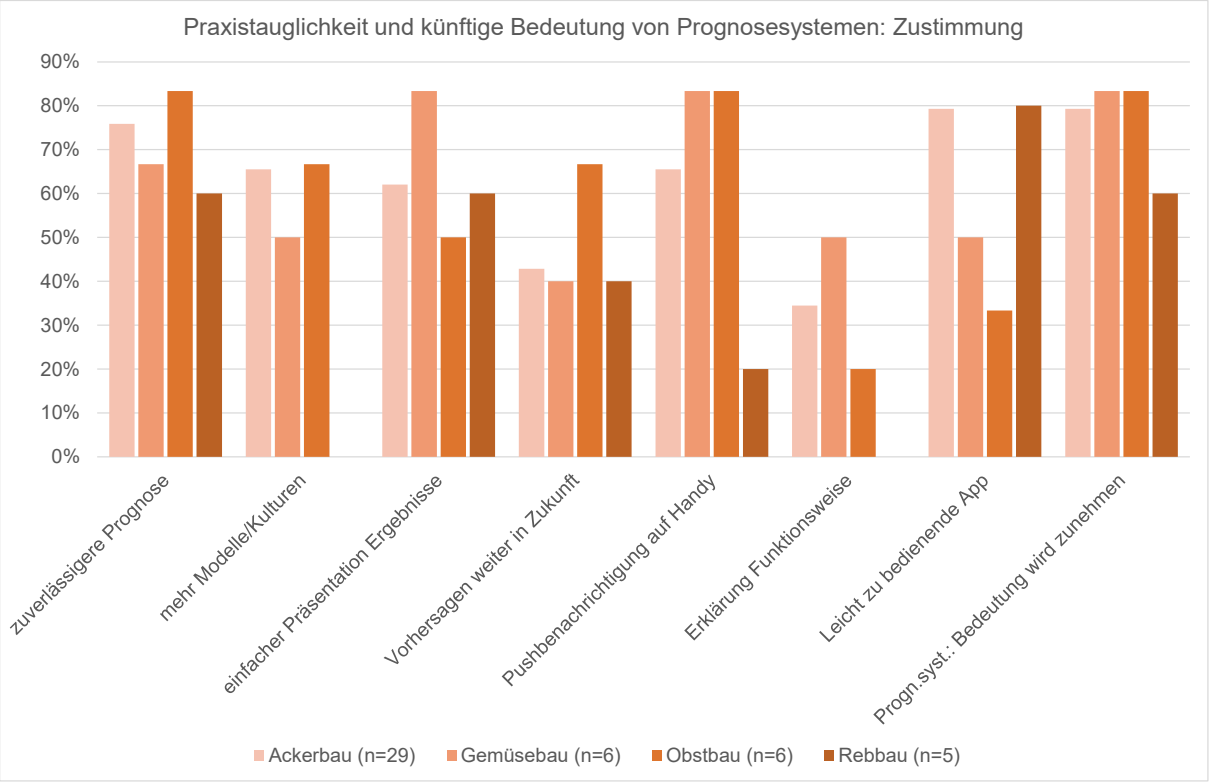


Abbildung 23: Anteil Zustimmung («stimme eher zu», «stimme voll zu») nach Betriebstyp auf die Frage, wie Prognosesysteme praxistauglicher gestaltet werden können und zu deren künftiger Bedeutung (n = 46).

Bei der Datenerfassung gaben die Landwirte weitere Vorteile der Prognosesysteme an. Die Landwirte schätzen an den Prognosesystemen, dass sie das Infektionsrisiko für einige Tage im Voraus angeben. Falls die App ein erhöhtes Infektionsrisiko anzeigt und die Landwirte PSM ausbringen werden müssen, können sie so die Tage zuvor planen. So haben sie dann am Tag der Applikation auch Zeit dafür.

Der Einsatz von Prognosesystemen führt nur selten zu einer Einsparung von Pflanzenschutzmitteln (PSM). Selbst wenn Landwirte die Empfehlungen der Prognosesysteme befolgen, bleibt die ausgebrachte Menge häufig auf dem gleichen Niveau. Der Grund dafür ist, dass Prognosesysteme genauso häufig eine PSM-Anwendung empfehlen, wie es Landwirte auch ohne deren Unterstützung tun würden. Dadurch bleiben die möglichen Kosteneinsparungen gering (Wenzinger, 2024, mündliche Quelle).

Überdies empfinden manche Landwirte die Anwendung von Prognosesystemen als wenig alltagstauglich. Wenn der Wetterbericht sagt, dass es die nächsten Tage noch schön wird und danach viel regnet, wird der Landwirt die Zeitfenster in den trockenen Tagen nutzen, um Pflanzenschutzmittel auszubringen. Er getraut sich dann teilweise nicht, mit dem Ausbringen von PSM abzuwarten, so dass nur wenig bis kein PSM eingespart werden kann.

Der Zeitaufwand ist für den Landwirt zu Beginn der Nutzung grösser, da er sich jeweils in die neue Technologie einarbeiten muss. Eine geringe Nutzerfreundlichkeit von Prognosesystemen kann dieses Problem verschärfen. Wenn ein System nur via Laptop oder PC zugänglich ist, ist das für die Landwirte jeweils ein grösserer Aufwand, als wenn sie nur eine App auf ihrem Handy anklicken müssen. Die Benutzung ist auch einfacher, wenn gleich beim ersten Blick auf der Website ein relevantes Diagramm erscheint. Müssen die Landwirte aber zuerst noch ein Dokument herunterladen, hemmt das die Nutzung der Website wieder. Zwar wäre eine Umstellung der Website mit Kosten verbunden, jedoch könnte das die Nutzerzahlen erhöhen. Seitens Anbieter würde wiederum Geld gespart werden, wenn auf Prognosemodelle, die sowieso kaum verwendet werden, verzichtet werden würde. Das Modell für das Auftreten des Traubenwicklers wird zum Beispiel von den Rebbauern kaum benötigt, da für die Abwehr des Schädlings mit Verwirrungshormonen gearbeitet wird. Diese Hormonfallen werden an die Drähte in den Rebbergen gehängt und die Bekämpfung hat sich damit erledigt. Das Modell bietet in dieser Situation wenig Zusatznutzen.

Wetterstationen

Wetterstationen wurden den Landwirten im Rahmen des Projektes PFLOPF zur Verfügung gestellt. Die Wetterstationen wurden in allen Betriebszweigen verwendet. Diese Stationen liefern Daten für standortangepasste

Prognosen. Sie werden als zuverlässig, verständlich in der Anwendung und als bedeutend beurteilt, die Benutzerfreundlichkeit wird als neutral eingestuft. Durch die Verwendung der Wetterstationen lassen sich direkt zwar PSM-Applikationen nicht reduzieren, indirekt können sie durch ihre Datenlieferung an Prognosemodelle jedoch einen Beitrag leisten. Die Informationen von Wetterstationen werden in der Regel täglich oder wöchentlich betrachtet.

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Wetterstationen wird von Landwirten in allen Betriebszweigen als positiv eingeschätzt (vgl. Abbildung 24). Während des Projektes wurden die Anschaffungs- und Wartungskosten der Wetterstationen allerdings übernommen. Im Rebbau ist im Vergleich zu den anderen Betriebszweigen der Anteil der Antwortenden, die mit dem Kosten-Nutzen-Verhältnis der Wetterstationen unzufrieden sind, am grössten. Insgesamt fällt aber auch hier die Bilanz positiv aus. Im Obstbau empfinden alle Landwirte das Kosten-Nutzen-Verhältnis als positiv.

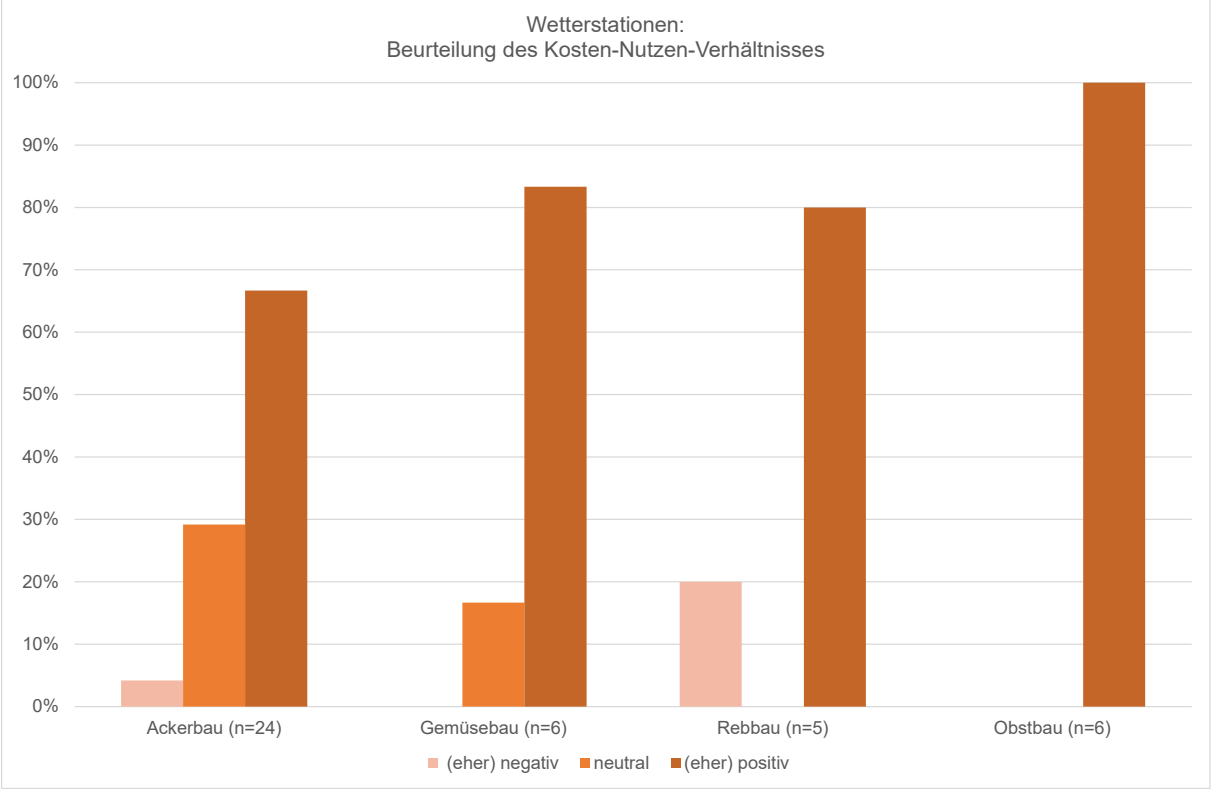


Abbildung 24: Einschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der Wetterstationen im jeweiligen Betriebszweig durch die PFLOPF Landwirte.

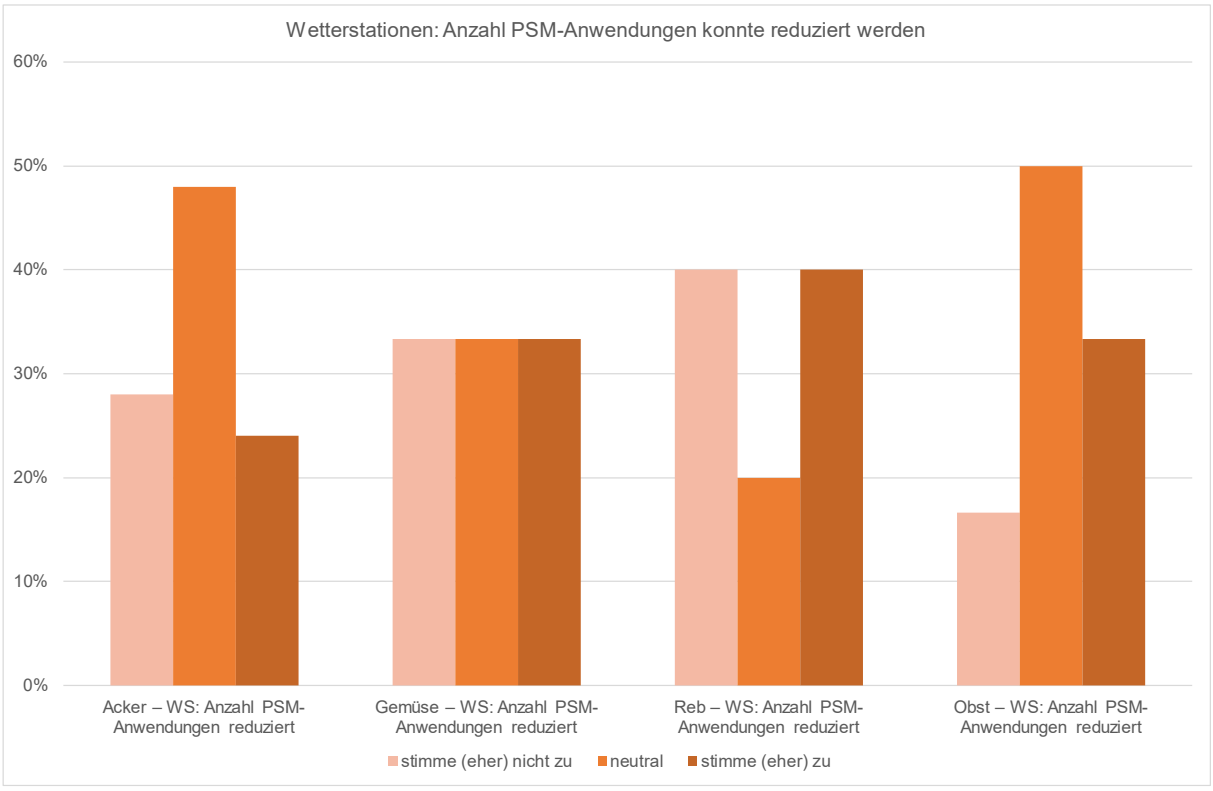


Abbildung 25: Beurteilung des PSM-Reduktionspotentials durch die Verwendung von Wetterstationen.

In persönlichen Gesprächen wurden Nachteile der Wetterstationen benannt. Während die Wetterstationen Anschaffungskosten von einigen tausend Franken nach sich ziehen, können sie während der Nutzung hohe Wartungsaufwände verursachen. Die Wetterstation ist dann funktionsuntüchtig und die Reparatur verursacht Kosten. Laut einigen Landwirten sind die Wetterstationen, die von MeteoSchweiz verwendet werden, zu weit entfernt, so dass sich nur schwer Rückschlüsse über die Situation auf den eigenen Betrieben ziehen lassen. Betriebsnahe Wetterstationen, wie sie im Projekt PFLOPF angewandt wurden, werden demnach als vorteilhaft erachtet.

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Das Projekt PFLOPF hat die Landwirte dazu motiviert, sich stärker mit Prognose- und Monitoringsystemen auseinanderzusetzen und ihre herkömmliche Behandlungsstrategie zu überdenken. 22 von 29 befragten Landwirten haben die Prognosemodelle stärker als vor dem Projekt genutzt. Der Anteil von 25 % der Betriebe, welche Prognosemodelle nicht stärker genutzt haben, könnte ein Hinweis sein, dass das Vertrauen in die Modelle noch nicht gross genug ist. Die Landwirte schätzten das Risiko eines potenziellen Ertragsverlustes möglicherweise höher ein als die Zahlungen, die sie durch die Verwendung der Prognose- und Monitoringsysteme erhalten.

Wie die Prognose- und Monitoringsysteme in Zukunft verwendet werden, hängt vom Betriebszweig ab. Im Ackerbau sind nach Angaben der Landwirte gegenwärtig kaum Einsparungen möglich und die Umsetzung in der Praxis schwierig. Die aktuelle Einschätzung der Landwirte steht im Gegensatz zur Erwartung, dass der Einsatz künstlicher Intelligenz die Präzision von Prognosesystemen in Zukunft verbessern wird (Weigand, 2021). Dadurch könnten langfristig grössere Einsparungen bei PSM möglich sein. Da die Agrarpolitik den reduzierten Einsatz von PSM fördert, könnten Prognosesysteme dennoch an Bedeutung gewinnen.

Im Gemüsebau wäre der Bedarf nach Prognosesystemen im Vergleich zum Ackerbau höher, hier herrscht allerdings das Problem, dass schweizweit sehr viele verschiedene Gemüsekulturen angebaut werden. Es müsste somit mehr Modelle für verschiedene Kulturen geben, die auch konkrete Prognosen ausgeben, welche regionale Bedingungen berücksichtigen.

Im Obstbau haben die Landwirte grösstenteils positive Rückmeldungen zu den verschiedenen Prognosesystemen gegeben. Sie würden es aber begrüssen, wenn die Prognosen weiter in die Zukunft gehen würden.

Im Rebbau werden die Prognosesysteme zum Echten und Falschen Mehltau genutzt und bereiten keine Schwierigkeiten, was aber daran liegt, dass der Gebrauch von Prognosesystem schon seit Jahren weit verbreitet ist und für die Landwirte keine Neuigkeit mehr darstellt.

Auch wenn die Prognosesysteme mit einigen Herausforderungen zu kämpfen haben, sind die Befragten aller Betriebszweige der Meinung, dass Prognosesysteme in Zukunft an Bedeutung zunehmen werden.

6.6 Automatische Lenksysteme (M2)

Methoden und Daten

Bei dieser Massnahme wird ein Traktor ohne Lenksystem mit einem Traktor mit Lenksystem verglichen. Der Vergleich der zwei Verfahren erlaubt Aussagen über veränderte Kosten und Nutzen. Die Kosten setzen sich aus den Maschinenkosten, den Direktkosten und den Arbeitskosten zusammen. Die Maschinenkosten je Arbeitseinheit hängen dabei ab vom Anschaffungspreis, der Auslastung und den Kosten für das RTK[4] Signal, Reparaturen, Abschreibungen und Zinskosten. Die Maschinenkosten nehmen durch das Lenksystem zu, während die effizientere Arbeitserledigung die Traktorstunden reduziert[5]. Bei den Direktkosten ergeben sich Einsparungen infolge einer verringerten Überlappung der Fahrgassen bei Saatgut, Pflanzenschutz- und Düngemitteln. Die Kalkulation basiert auf einem durchschnittlich grossen Betrieb vom Typ Ackerbau mit 32,5 ha offener Ackerfläche (vgl. Kapitel 6.18.3.1).

Bei der Befragung der Landwirte wurden Anschaffungskosten zwischen 10 000 und 25 000 Franken genannt, für die Berechnung wurde von Anschaffungskosten von 15 500 Franken ausgegangen. Wenn die Zugkraftstunden zur Bewirtschaftung der für den typischen Ackerbaubetrieb üblichen Kulturen addiert und mit den Flächen eines durchschnittlichen Ackerbaubetriebs multipliziert werden (siehe Kapitel 6.18.3.1), erhält man eine relevante Auslastung von 480 Stunden. Im Folgenden wird die etwas geringere Auslastung von 400 Stunden gemäss TractoScope zugrunde gelegt. Bei einem Lenksystem fallen für das erforderliche Korrektursignal spezifische Gebühren an.

Die fixen Kosten belaufen sich pro Jahr auf knapp 2000 Franken, um ein Lenksystem zu betreiben (vgl. Tabelle 14). Wird das Lenksystem in diesem Jahr 400 Stunden verwendet, kostet das Lenksystem pro Stunde somit 4.96 Fr. Mit zunehmender Auslastung sinken die jährlichen Fixkosten je Arbeitseinheit (AE), d. h. je Einsatzstunde. Dazu kommt noch ein Ansatz für eventuell anfallende Reparaturen von 30 Rappen, wodurch Kosten von 5.26 Fr. pro Stunde in Gebrauch anfallen (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Auflistung der für Lenksysteme relevanten Grunddaten und resultierenden Kosten.

Lenksystem	
Anschaffungspreis (Fr.)	15'500
Auslastung pro Jahr (h)	400
Kostenberechnung in Fr.	
Abschreibung	930
Versicherungen u. Gebühren	903
Weitere Kosten	149
Total Fixe Kosten (im Jahr)	1'982
Reparaturen u. Unterhalt	0.30
Total Variable Kosten (je h)	0.30
Entschädigungsansatz (Fr./h)	**5.26**

[4] RTK steht für Real-Time Kinematics; dieses Verfahren dient der genauen Positionsbestimmung.
[5] Während die Arbeitseinheit des Traktors die Traktorstunde ist, werden die angehängten Maschinen je Flächeneinheit kalkuliert. Daher wird für diese Maschinen keine Ersparnis angesetzt.

Es wurde eine Einsparung an Direktkosten von 1,5 % angenommen, wenn Lenksysteme eingesetzt wurden. Diese Einsparung wurde im Rahmen der auf knapp 60 % der PFLOPF-Betriebe mit Lenksystemeinsatz durchgeführten Messungen erhoben (Latsch, 2024; mündliche Quelle).

Bei der Onlinebefragung wurden die Landwirte befragt, ob sie durch die Verwendung eines Lenksystems Unterschiede in der Arbeitszeit festgestellt haben. Die meisten Landwirte gaben in der Onlineumfrage an, dass sie nun schneller sind als vorher. Die Landwirte haben darauf aufmerksam gemacht, dass zu Beginn der Nutzung der Lenksysteme die Feldgrenzen abgefahren werden müssen. Bei rechteckigen Feldern müssen die Landwirte für die Aufzeichnung der Feldgrenzen aber nicht extra über die Felder fahren, sondern sie können die Aufzeichnung aktivieren, wenn sie sowieso eine Überfahrt, zum Beispiel zum Ausbringen von PSM, haben. Sind die Felder ungleichmässig geformt, kann es vorkommen, dass eine zusätzliche Überfahrt zum Aufzeichnen der Feldgrenzen notwendig wird. Diese Überfährt führt zu einem zusätzlichen Arbeitsaufwand, wenn das Lenksystem zum ersten Mal benutzt wird. Im Laufe der Jahre, in denen das Lenksystem verwendet wird, wird aber so viel mehr Arbeitszeit eingespart, dass der anfängliche zusätzliche Arbeitsaufwand kompensiert wird. In der Literatur wird beim Einsatz eines Lenksystems in der Regel ebenfalls eine Reduktion der Arbeitserledigungskosten angenommen (Holpp, 2006, Mees und Hedtrich, 2018, Böhm und Musshoff, 2012). Die Reduktion der Arbeits- und Traktorzeit liegt dabei im Bereich zwischen 1 % (Holpp, 2006) und beinahe 10 % (Böhm und Musshoff, 2012). Im Folgenden wird mit einer mittleren Reduktion in Höhe von 5 % gerechnet.

Resultate

Unter den getroffenen Annahmen resultieren Maschinenkosten von etwa 2104 Fr. pro Jahr, um ein Lenksystem zu betreiben (Tabelle 14). Durch die 1,5 % Reduktion an Direktkosten (PSM, Saatgut, Düngung), die durch das Lenksystem ermöglicht werden, können im Ackerbau pro Jahr etwa 566 Franken eingespart werden. Auch die Arbeitszeit kann durch ein Lenksystem reduziert werden. In diesem Fall wurde von 5 % Arbeitszeitreduktion ausgegangen, bei einem Stundenlohn von 31 Franken pro Stunde können somit 744 Franken pro Jahr eingespart werden. Mit der Arbeitszeit sinken auch die Traktorkosten, und zwar um 955 Franken Die Verwendung eines Lenksystems resultiert demnach in einer Kostenersparnis von jährlich Fr. 2265.- (Tabelle 15). Dies entspricht Fr. 69.70 je ha beim zugrundeliegenden durchschnittlichen Ackerbaubetrieb.

Tabelle 15: Jahreskosten und jährlich Einsparung von Betriebsmittel-, Arbeitszeit- und Traktorkosten eines Lenksystems für einen Ackerbaubetrieb mit 32.5 ha offener Ackerfläche.

		Einsparung	Kosten je h	Einsparung (Fr.)
Summe Direktkosten (Fr.)	37724	1.5%		566 Fr.
Summe Arbeitsstunden (h)	480	5.0%	31.00 Fr.	744 Fr.
Summe Traktorkosten (h)	480	5.0%	39.78 Fr.	955 Fr.
Summe Einsparung in Fr. je Jahr				**2'265 Fr.**

Die Kosten für das Lenksystem pro Jahr sind mit 2104 Franken um 161 Franken niedriger als die Ersparnis, die durch die Reduktion der Direktkosten und der Arbeitszeit möglich ist. Der Einsatz eines Lenksystems lohnt sich aus finanzieller Sicht unter den getroffenen Annahmen.

Fällt die Reduktion der Direktkosten oder der berücksichtigen Arbeitserledigungskosten niedriger aus, wird die Ersparnis geringer. Das Lenksystem ist bei einer Einsparung von 1,1 % der Direktosten und von 4,6 % der Zeit noch wirtschaftlich. Bei der errechneten Ersparnis von rund Fr. 70.- je ha lohnt sich der Einsatz eines Lenksystems bereits für einen kleineren Betrieb ab rund 30 ha offener Ackerfläche.

Onlinebefragung

Die Landwirte sind sich in der Bewertung des Lenksystems grösstenteils einig. Die Anschaffungskosten sowie die Kosten des Korrektursignals empfinden die Landwirte als hoch. Das Lenksystem ist aber nützlich und für die Mehrheit der Landwirte einfach zu benutzen. Deshalb würden fast alle beim nächsten Traktor, den sie kaufen, ein Lenksystem integrieren lassen und die meisten würden auch anderen Landwirten die Anschaffung empfehlen. Der wichtigste

Kaufgrund ist die grössere Genauigkeit, die man durch die Verwendung des Lenksystems erhält. Auch die Arbeitsentlastung ist für viele Landwirte ein wichtiger Aspekt. Einsparungen an Betriebsmitteln sind für die Landwirte nicht ganz so relevant (vgl. Abbildung 26).

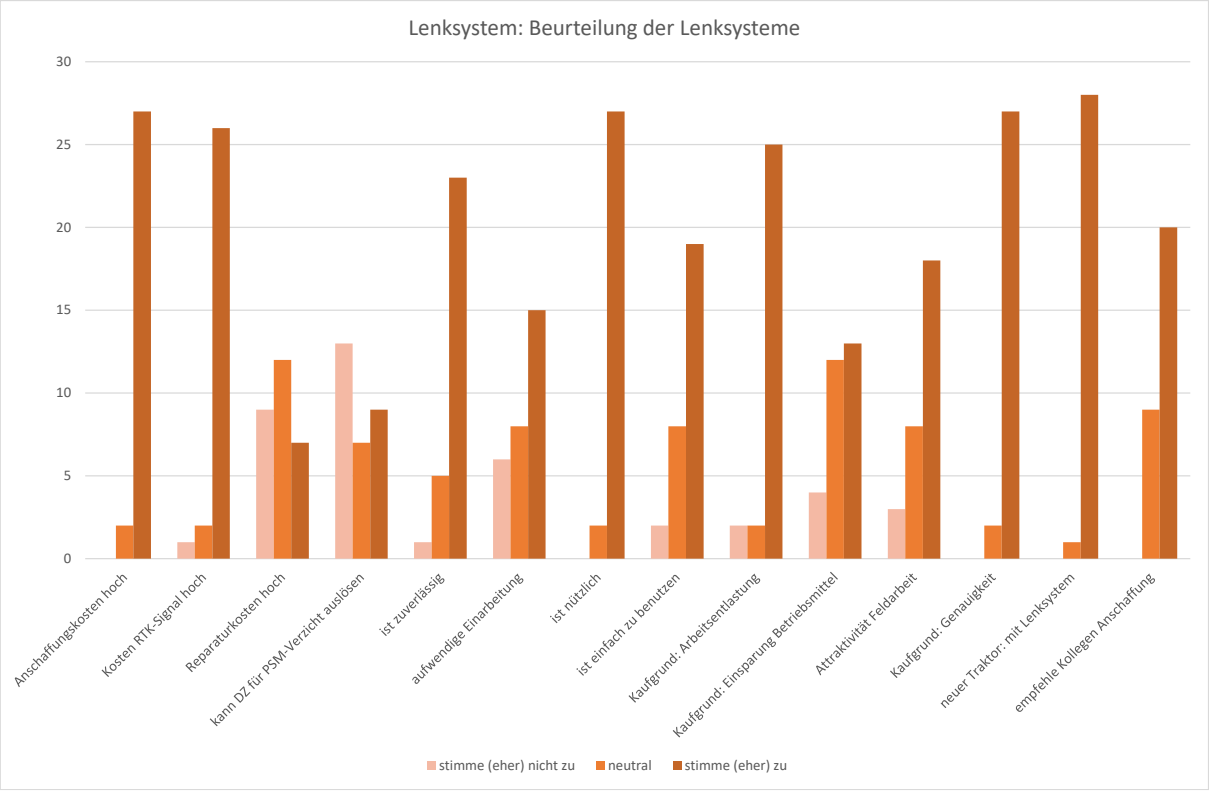


Abbildung 26: Beurteilung von Lenksystemen durch Ackerbaubetriebe im Projekt PFLOPF (n = 29). Quelle: Befragung der PFLOPF-Ackerbaubetriebe. 28–29 Rückmeldungen. Eigene Darstellung

Diskussion

Der Einsatz eines Lenksystems ist infolge der damit einhergehenden Einsparungen für einen durchschnittlich grossen Ackerbaubetrieb gegenwärtig wirtschaftlich. Für Lohnunternehmen oder grosse Ackerbaubetriebe ist die Wirtschaftlichkeit noch besser. Für kleinere Betriebe bieten sich kostengünstige Anschaffungen an. So besteht die Möglichkeit, ein automatisches Lenksystem zu erwerben, das nicht im Traktor integriert wird, sondern flexibel auf das benötigte Gerät montiert werden kann. So kann ein Lenksystem zwischen mehreren Betrieben und Maschinen geteilt und die nötige Auslastung erreicht werden. Egal, ob das Lenksystem auf einem grossen Betrieb, einem Lohnunternehmen oder bei mehreren Traktoren eingesetzt wird, es muss sichergestellt werden, dass die Auslastung genügend hoch ist. Nur so kann der im Verhältnis zum Einsparpotential an Direktkosten hohe Anschaffungspreis aufgewogen werden. Der hohe Anschaffungspreis und die Kosten für das hochpräzise Korrektursignal sind auch ein wichtiger Aspekt für die Landwirte.

Die Wirtschaftlichkeit von Lenksystemen in Abhängigkeit von der Einsatzfläche[6] bzw. der Betriebsfläche wurde bereits in anderen Untersuchungen berechnet. Holpp (2006) kommt bei seinen Berechnungen darauf, dass Kostengleichheit bei einer Einsatzfläche von 250–400 Hektaren erreicht wird. Böhm und Musshoff (2012) berechnen aufgrund der Einsparungen an Betriebsmitteln die erforderliche Ackerfläche eines Betriebes. Je nach Annahme lohnt sich ein Lenkautomat ab etwa 250 Hektaren Ackerfläche. Laut Mees und Hedtrich (2018) lohnt sich ein Lenksystem in Deutschland bei einer Einsatzfläche von 180 Hektaren pro Jahr. Der hier zugrunde gelegte Ackerbaubetrieb bei einer offenen Ackerfläche von 32,5 ha weist eine Einsatzfläche von etwa 300 Hektaren auf.

Ein Lenksystem erleichtert das Wenden am Feldende und kann somit die Arbeitszeit und die Traktorstunden reduzieren. Die Einschätzungen zur tatsächlichen Einsparung variieren jedoch stark. Während Holpp (2006) eine Reduktion von 1 % angibt, fanden Holpp et al. (2013) keine signifikante Einsparung. Mees und Hedtrich (2018)

[6] Die landwirtschaftliche Fläche multipliziert mit der Anzahl Überfahrten ergibt die Einsatzfläche.

nennen eine Reduktion von 5 %, während Musshoff und Böhm (2012) eine Einsparung von 10 % der Arbeitserledigungskosten annahmen. In dieser Analyse wird von einer mittleren Reduktion von 5 % der Arbeitszeit und der Traktorkosten ausgegangen.

Die genannten Studien haben auch die Einsparung von Direktkosten untersucht. Holpp (2006) geht von einer Reduktion von 1,7 %, Mees und Hedtrich (2018) von einer Reduktion von 3 % und Böhm und Musshoff (2012) von einer Reduktion von 7 % aus. Auf dem Feld wurde in PFLOPF eine durchschnittliche Reduktion von 1,5 % beim Pflanzenschutzmitteinsatz gemessen. Die hier zugrunde gelegten Einsparungen sind somit geringer als in früheren Analysen.

Neben der wirtschaftlichen Rentabilität spielen auch arbeitsorganisatorische Vorteile eine Rolle. Ein Lenksystem stellt eine Arbeitsentlastung dar, so dass der Fahrer oder die Fahrerin weniger schnell ermüden. Zudem fällt das Konzentrieren auf andere Aspekte der Arbeit leichter, wie auch in der Onlinebefragung und in der Datenerfassung gesagt wurde. Landwirte nennen Beispiele wie, dass überprüft werden kann, ob die Spritzdüsen funktionieren und somit die korrekte Menge an PSM ausgebracht wird, während der Traktor von alleine fährt. Es kann auch bei schlechter Sicht oder noch in der Dämmerung gefahren werden. Es ist auch möglich, weniger gut ausgebildete Arbeitende wie Lernende den Traktor fahren zu lassen, so dass qualifizierte Mitarbeitende anspruchsvollere Tätigkeiten übernehmen können. Die Arbeit lässt sich zeitlich somit besser verteilen. Durch das präzisere Fahren können laut den Landwirten zudem Überfahrten gespart werden, was zu geringerer Bodenverdichtung führt.

Diese Vorteile sprechen für die Verwendung von Lenksystemen. Lenksysteme und das damit verbundene Globale Satellitenpositionierungssystem GPS sind zudem Grundsteine für weitere Technologien im Bereich Precision Farming (Gabriel und Gandorfer, 2023). Bei Bedarf kann somit auch auf Geräte wie Spritzen mit Teilbreiten- und Einzeldüsenschaltung aufgerüstet werden. Es ist davon auszugehen, dass sich in Zukunft der Einsatz von Lenksystemen deshalb noch weiterverbreiten (Kehl, Meyer und Steiger, 2021) und eventuell sogar zur Standardausrüstung eines Ackerbautraktors gehören wird.

Es gibt aber auch Herausforderungen von Lenksystemen, die nicht finanzieller Natur sind. Je nachdem, wo sich das Feld befindet, ist der GPS-Empfang nicht gegeben. Fällt der Empfang nur über kurze Strecken aus, verfügt das Lenksystem über ein Programm, dass die Weiterfahrt noch gewährleistet. Wenn der Empfang aber über längere Zeit ausfällt, muss wieder von Hand gesteuert werden. Oft sind das dann auch die Stellen, die schwieriger zu steuern sind, wie zum Beispiel in der Nähe von Wäldern oder an steilen Stellen. Die Befragung der Landwirte hat aber gezeigt, dass solche Ausfälle nur selten vorkommen und die Lenksysteme in der Regel schnell wieder einsatzfähig sind.

Es sollte auch das Alter des Traktors bedacht und überlegt werden, ob sich die Investition in die Nachrüstung eines Lenksystems lohnt oder ob nicht besser auf den Kauf eines neuen Traktors gewartet werden sollte, bei dem sich das Lenksystem gleich integrieren lässt.

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Bereits vor 2019, dem Startjahr von PFLOPF, nutzten 68 % der Betriebe Lenksysteme. Diese Systeme sind für Landwirte daher weniger neu und innovativ als andere Maßnahmen. Die Anschaffungskosten von Lenksystemen könnten weiter sinken, da es mehr Anbieter gibt und die Technik sich immer weiter verbreitet. Es kann angenommen werden, dass sich künftig der Einsatz der Lenksysteme noch verstärken wird, da der Grossteil der befragten Ackerbetriebe bei der Anschaffung eines neuen Traktors ein Lenksystem mitkaufen will und die Anschaffung auch Berufskollegen empfehlen würde.

6.7 Teilbreitenschaltung (M3)

Methoden und Daten

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde eine Spritze mit und ohne automatische Teilbreitenschaltung verglichen (Tabelle 16). Eine Spritze mit Teilbreitenschaltung kann ohne Lenksystem auf dem Traktor betrieben werden. Eine automatische Teilbreitenschaltung wird auf grösseren Betrieben jedoch häufig auf einem Traktor mit Lenksystem eingesetzt. Die Verwendung einer automatischen Teilbreitenschaltung ermöglicht eine exaktere Überlappungssteuerung und eine optimale Flächenabdeckung und bedeutet für den Fahrer weniger Belastung. Die

Kosten für eine automatische Teilbreitenschaltung wurden mit Anschaffungskosten von 3500 Franken kalkuliert. Zudem fallen für Teilbreitenschaltungen einmalige Gebühren für die Software und Freischaltung an (Wenzinger, mündliche Quelle, 2025). Ein Landwirt hat diese einmaligen Gebühren auf Fr. 1500.- beziffert; diese werden dem Anschaffungspreis der Teilbreitenschaltung zugerechnet.

Die Kosten für den Traktor unterscheiden sich in den Szenarien ebenfalls. Während bei der konventionellen Spritze von einem Traktor mit Anschaffungskosten von 93 000 Franken ausgegangen wird, fallen die Anschaffungskosten für den Traktor, der die Spritze mit der automatischen Teilbreitenschaltung zieht, höher aus. Für die Anschaffung eines ISOBUS-Anschlusses werden Fr. 3500.- angesetzt. Die weiteren Annahmen wurden vom Kostenkatalog übernommen

Die Auslastung der Spritze mit automatischer Teilbreitenschaltung wurde berechnet, indem die nötigen PSM-Applikationen der Kulturen eines Betriebs vom Typ «Ackerbau» aus der Einkommensstatistik mit den jeweiligen Flächen multipliziert[7] wurden (siehe Kapitel 6.18.3.2). Dies ergibt eine jährliche Einsatzfläche (Auslastung) der Spritze von 126 ha. Die angenommene Auslastung der Spritze (126 ha) fällt damit geringer aus als die im Kostenkatalog angegebenen 250 ha.

Tabelle 16: Auflistung der für eine Spritze (21 m) mit automatischer Teilbreitenschaltung relevanten Annahmen und Kosten.

	konventionelle Spritze (21 m)	Spritze mit Teilbreitenschaltung
Anschaffungspreis	39'000 Fr.	44'000 Fr.
Auslastung pro Jahr	126 ha	126 ha
Abschreibungszeit	15 Jahre	15 Jahre
Kostenberechnung in Fr. pro Jahr		
Abschreibung	1'950 Fr.	2'200 Fr.
Versicherung u. Gebühren	78 Fr.	78 Fr.
Weitere Kosten	613 Fr.	665 Fr.
Summe fixe Kosten jährlich	2'641 Fr.	2'943 Fr.
Reparaturen und Unterhalt	7.80 Fr.	8.80 Fr.
Summe variable Kosten je ha	7.80 Fr.	8.80 Fr.
Entschädigungsansatz pro ha	**28.76 Fr.**	**32.16 Fr.**

Auf der Nutzenseite der Teilbreitenschaltung wird davon ausgegangen, dass je nach Feldform etwa 4 % der PSM, die im Referenzverfahren ausgebracht werden, eingespart werden können (Latsch, 2024, mündliche Quelle). Dieser Wert ist bei Untersuchungen in der Praxis ermittelt worden. Bei sehr ungünstig geformten Schlägen kann das Einsparpotential höher sein, während es bei rechteckigen Feldern oder geringeren Breiten der Spritze geringer ausfallen kann. Dass bei geringeren Arbeitsbreiten weniger PSM eingespart wird, wurde bei Messungen für das Projekt PFLOPF festgestellt. Das geringere Einsparpotential könnte daran liegen, dass es mit einer kleineren Spritze einfacher ist, präzise den Grenzen des Feldes entlangzufahren und die Teilbreiten manuell aus- und einzuschalten.

Bei Verwendung eines Lenksystems beim Verfahren mit Teilbreitenschaltung wird eine Reduktion der Arbeitserledigungskosten analog zum vorigen Kapitel angenommen. In diesem Fall fallen die Traktorkosten (Arbeitseinheit in Stunden) sowie die Arbeitskosten entsprechend um 5 % niedriger aus als im Referenzverfahren.

[7] Bei Weizen wurde zum Beispiel von drei nötigen Spritzungen ausgegangen. Ein Betrieb mit dem Betriebstyp «Ackerbau» wie in der Einkommensstatistik bewirtschaftet eine Fläche von beinahe 11 Hektaren mit Brotgetreide. Multipliziert man diese Werte, erhält man eine Auslastung von 33 Hektaren. Wird das auch für die anderen Kulturen gemacht, erhält man eine Auslastung von 126 Hektaren.

Eine Einzeldüsenschaltung wurde nicht berechnet, da keine Daten zum Einsparpotential erhoben wurden. Die Verbreitung dieser Technologie ist noch gering, was auch mit den hohen Anschaffungskosten zusammenhängt. Die Landwirte gaben bei der persönlichen Datenerfassung an, eine Spritze mit Einzeldüsenschaltung koste zwischen 70 000 und 100 000 Franken. Die Investition in eine Einzeldüsenschaltung lohnt sich für durchschnittlich grosse Schweizer Ackerbaubetriebe gegenwärtig nicht.

Resultate

Wie in Tabelle 17 ersichtlich, entstehen durch die Verwendung einer Teilbreitenschaltung höhere jährliche Maschinenkosten. Beim Traktor mit Lenksystem fallen diese infolge der angenommenen 5 % höheren Flächenleistung zwar etwas niedriger aus, die Kosten der Spritze und des Lenksystems sind dafür höher. Die Einsparung von PSM reduziert die Direktkosten für Pflanzenschutzmittel um 420 Franken jährlich, die Einsparung je ha offene Ackerfläche (OAF) beträgt im Mittel Fr. 12.93. Unter dem Strich entstehen für eine Spritze mit Teilbreitenschaltung sowohl mit als auch ohne Lenksystem auf einem mittelgrossen Betrieb des Typs Ackerbau leicht höhere Verfahrenskosten im Vergleich zur konventionellen Spritze. In einem Jahr gleichen die Einsparungen an PSM und Arbeitszeit die höheren Maschinenkosten nahezu aus.

Tabelle 17: Kosten für eine Teilbreitenschaltung (TBS) auf einem durchschnittlich grossen Betrieb vom Betriebstyp Ackerbau (32,5 ha OAF) nach der Einkommensstatistik von Agroscope (Hoop et al., 2024).

Kosten in Fr. je Jahr	Konventionelle Spritze	Spritze mit Teilbreitenschaltung ohne Lenksystem	Spritze mit Teilbreitenschaltung mit Lenksystem
Traktor	1247	1270	1207
Spritze mit/ohne TBS	3624	4052	4052
Lenksystem	0	0	165
Arbeitskostenansatz	972	972	923
Kosten Pflanzenschutzmittel	10495	10075	10075
Jahreskosten	**16337**	**16369**	**16422**

Onlinebefragung

Eine Teilbreitenschaltung wird als nützlich und benutzerfreundlich angesehen und der häufigste Anschaffungsgrund ist die Arbeitsentlastung, die mit der automatischen Schaltung der Teilbreiten möglich wird. Die Kosten werden nicht als hoch angesehen, was sich darin zeigt, dass die Landwirte weder der Aussage «die Maschinenkosten sind hoch», noch der Aussage «die Kosten für den Unterhalt sind hoch» oder der Aussage «ich muss mit einer Teilbreitenschaltung die Ventile häufiger ersetzen» klar zustimmen. Die Landwirte scheinen von der Technologie überzeugt zu sein, denn sie würden Kollegen die Anschaffung meistens empfehlen oder sie stehen einem Kauf neutral gegenüber.

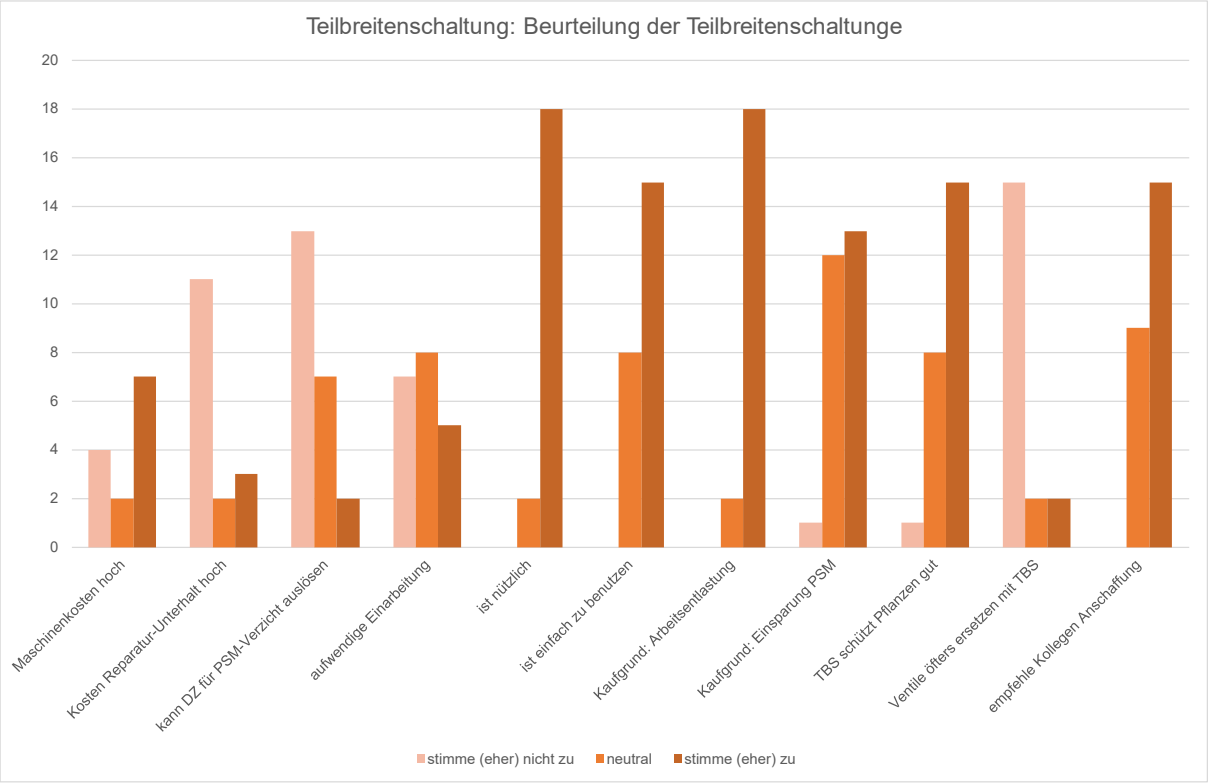


Abbildung 27: Beurteilung von Teilbreitenschaltungen durch Ackerbaubetriebe im Projekt PFLOPF (n = 19).

Diskussion

Velandia et al. (2013) haben ebenfalls die Wirtschaftlichkeit von Teilbreitenschaltungen betrachtet. Sie haben sich jedoch auf den Einsatz der Teilbreitenschaltungen bei Pflanzmaschinen konzentriert, weshalb kein direkter Vergleich möglich ist. Auch sie haben das Einsparpotential aufgrund der geringeren Überlappungen in Prozent berechnet. Sie erhielten eine Spannbreite zwischen 0,1 % und 15,5 %. Diese Spannbreite ist verhältnismässig gross, was aber damit zusammenhängt, dass bei dieser Arbeit Felder in den USA untersucht wurden, die sich in ihrer Grösse und Form von den Feldern in der Schweiz unterscheiden. Zudem wurden im Artikel von Valandia et al. (2013) 52 Felder untersucht, für das Projekt PFLOPF erfolgten Messungen auf sechs Feldern.

Luck et al. (2010) haben bei ihren Messungen eine Reduktion der Überlappung von 12,4 % auf 6,2 % ermittelt, Die Reduktion an PSM beträgt 6,2 %, was etwas höher als die hier gemessenen Werte ist. Zahlen zur Wirtschaftlichkeit geben sie keine an. Beim Ausmass der Einsparung gehen die Werte ähnlich wie bei Velandia et al. (2013) auseinander: die kleinste geschätzte PSM-Einsparung liegt bei 1 %, die grösste bei 20 %.

Für die Landwirte ist die Arbeitsentlastung ein wichtiger Kaufgrund neben der PSM-Einsparung (siehe Abbildung 27). Da PSM gezielter eingesetzt werden können, kann nicht nur Geld gespart werden, sondern auch benachbarte Felder oder Wege am Feldrand können besser geschützt werden. Zudem kann der Fahrer sich besser darauf konzentrieren, ob die Höhe des Gestänges oder der Druck der Spritze stimmt, da man nicht mehr manuell die Teilbreiten ein- und ausschalten muss. Pflanzenschutzmittel, die am besten wirken, wenn sie in der Nacht ausgebracht werden, da dann die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit besser sind, können nun ebenfalls leichter gespritzt werden.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Flächenspritzung nun einfacher durchzuführen ist, da man weniger auf den Feldrand und das Vorgewende achten muss. Nun kann diese Arbeit auch von weniger erfahrenen und qualifizierten Personen ausgeführt werden. Das Ausbringen von PSM gehört zu den anspruchsvolleren Aufgaben eines Landwirtes, es ist deshalb weiterhin darauf zu achten, dass das Personal über das nötige Können verfügt, PSM auszubringen und entsprechend geschult wird, die Teilbreitenschaltung zu bedienen. Sind die Arbeiter aber instruiert, kann die Teilbreitenschaltung zu einer besseren Arbeitsverteilung beitragen. Der Arbeitsaufwand zur Einarbeitung wird von den Landwirten ungefähr gleichermassen als niedrig, neutral und hoch eingeschätzt.

Wichtig ist bei der Teilbreitenschaltung aber, zu überlegen, ob es sich eher lohnt, eine bestehende Spritze nachzurüsten oder in eine neue Spritze zu investieren. Ein Nachrüstkit kostet weniger, ist aber mit einem höheren

Arbeitsaufwand zur Installation verbunden. Eine neue Spritze hat eine Teilbreitenschaltung manchmal schon integriert, wodurch dann der Zeitaufwand für die Installation wegfällt. Wenn die Spritze sowieso bald ersetzt werden muss, lohnt sich somit die Investition in eine integrierte Teilbreitenschaltung.

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Die Betriebe, die eine Teilbreitenschaltung verwendet haben, haben die Schaltung zu 65 % schon vor dem Jahr 2019 verwendet. Nur wenige Betriebe haben sich gleichzeitig mit dem Start des Projektes PFLOPF eine Teilbreitenschaltung angeschafft.

Auch Teilbreitenschaltungen gehören zu den Massnahmen, die im Projekt PFLOPF häufiger umgesetzt wurden. Dies weist auf eine grössere Verbreitung der Technik auch ausserhalb des Projektes hin. Teilbreitenschaltungen benötigen relativ wenig Einarbeitung und auch die Anschaffungskosten sind noch nicht so hoch, dass potentielle Anwender abgeschreckt werden. In Zukunft wird sich vermutlich die Teilbreitenschaltung noch weiterverbreiten. Die Arbeitsentlastung ist hierbei ein wichtiger Grund und auch die Einsparung an PSM.

6.8 Spot-Spraying im Gemüsebau (M4)

Methoden und Daten

Beim Spot-Spraying im Gemüsebau werden zwei Verfahren näher betrachtet: Einerseits geht es um die Unkrautbehandlung in Zwiebeln. Das Referenzverfahren einer fünfmaligen Flächenbehandlung wird mit dem Einsatz einer Präzisionsspritze verglichen, welche Unkraut detektiert und punktuell bekämpft. Andererseits wird die Bekämpfung von Schädlingen und Pilzkrankheiten im Eisbergsalat analysiert. Hier wird eine Flächenbehandlung durch den Einsatz einer punktuellen Behandlung der Kultur mit Fungizid und Insektizid ersetzt.

Unkrautbehandlung in Zwiebeln

Bei der Unkrautbehandlung ist das Referenzverfahren eine fünfmalige ganzflächige Unkrautbehandlung mit einer herkömmlichen Pflanzenschutzspritze mit 15 m Arbeitsbreite. Mit einer Präzisionsspritze mit einer Arbeitsbreite von sechs Metern werden vier der Flächenbehandlungen ersetzt, die erste Behandlung erfolgt mit der herkömmlichen Pflanzenschutzspritze. Die Präzisionsspritze ermöglicht eine Herbizidreduktion von 85 % gegenüber einer Flächenbehandlung. Über alle fünf Unkrautbehandlungen resultiert damit eine Einsparung von 64 %. Die Präzisionsspritzung wurde durch einen Lohnunternehmer durchgeführt zu Kosten von 500 Fr./ha inkl. des Herbizids.

Die Kosten einer Behandlung gemäss Referenzverfahren (Anbaufeldspritze, 15 m) für die Arbeitserledigung inkl. Herbizidkosten betragen im Mittel[8] 207 Fr./ha (vgl. Tabelle 18). Die Differenz zum Lohnunternehmen mit Kosten in Höhe von 500 Fr./ha beträgt demnach 293 Fr./ha und ist beträchtlich.

Vergleicht man die zwei Verfahren, so ergibt die Einsparung von 85 % der ausgebrachten Herbizide eine Kostenersparnis von 137 Fr./ha (vgl. Tabelle 18). Entsprechend höher können die Arbeitserledigungskosten mit der Präzisionsspritze sein. Nimmt man eine Anschaffung der Präzisionsspritze durch einen Gemüsebaubetrieb an, ergeben sich bei deren Auslastung von jährlich etwa 85 ha vergleichbare Verfahrenskosten beim Zwiebelanbau; die Mehrkosten der Arbeitserledigung entsprechend dann etwa den Einsparungen an Herbiziden.

Die Anschaffung einer zusätzlichen Spritze zieht allerdings zusätzliche Fixkosten nach sich. Die erste Spritzung erfolgt auch im Precision Farming Szenario als Flächenspritzung und erfordert eine konventionelle Feldspritze. Durch die Anschaffung einer weiteren Pflanzenschutzspritze sinkt die Auslastung vorhandener Geräte, die weniger intensiv genutzt werden, so dass in der Folge deren Kosten je Arbeitseinheit (je ha) ansteigen. Die zusätzliche Anschaffung beider Geräte ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht nur für grosse Gemüsebaubetriebe, welche beide Pflanzenschutzgeräte entsprechend auslasten können, eine Option. Beim Ersatz einer Anbaufeldspritze kann unter der Voraussetzung, dass auch mit einer Präzisionsspritze Flächenbehandlungen durchgeführt werden können – wenn auch zu höheren Kosten – die Anschaffung einer Präzisionsspritze eine Alternative für weniger grosse Gemüsebetriebe darstellen. Die Anbauflächen und die entsprechenden Einsparungen bei PSM müssten dabei betriebsspezifisch kalkuliert werden.

[8] Die Kosten der einzelnen Herbizidbehandlungen unterscheiden sich je nach Auswahl der PSM. Hier wird der Mittelwert der Herbizidbehandlungen angesetzt.

Tabelle 18: Vergleich der Verfahrenskosten für eine Herbizidbehandlung eines Hektars Zwiebeln: Anbaufeldspritze (15 m Arbeitsbreite) gegenüber einer Präzisionsspritze mit 300 ha und 85 ha Auslastung.

	Konventionelle Spritze (15 m)	**Präzisionsspritze (6 m)**	
Anschaffungspreis	28'000 Fr.	130'000 Fr.	130'000 Fr.
Auslastung pro Jahr	100 ha	**300 ha**	**85 ha**
Kostenberechnung in Fr.			
Abschreibung	1'400 Fr.	13'000 Fr.	9'750 Fr.
Versicherungen u. Gebühren	56 Fr.	584 Fr.	584 Fr.
Weitere Kosten	413 Fr.	1'422 Fr.	1'617 Fr.
Summe fixe Kosten jährlich	*1'869 Fr.*	*15'006 Fr.*	*11'951 Fr.*
Reparaturen u. Unterhalt	7 Fr.	22 Fr.	
Summe variable Kosten je ha	*7 Fr.*	*22 Fr.*	
Entschädigungsansatz pro ha	**26 Fr.**	**72 Fr.**	**162 Fr.**
Traktorkosten Fr./ha	11 Fr.	13 Fr.	
Herbizidkosten, Mittelwert Fr./ha	162 Fr.	24 Fr.	
Lohnansatz (Fr./ha)	8.66 Fr.	10.33 Fr.	
Arbeitserledigungskosten inkl. Herbizidkosten je Überfahrt	**207 Fr.**	**120 Fr.**	**210 Fr.**
Flächenleistung (ha/h)	3.58	3.00	

Fungizid- und Insektizidbehandlung von Eisbergsalat

Im Eisbergsalat wird die Behandlung der Salatköpfe mit Insektiziden und Fungiziden betrachtet. Das Referenzverfahren ist auch hier der Einsatz einer Anbaufeldspritze (15 m Arbeitsbreite) und die flächige Ausbringung der PSM. Im Projekt PFLOPF wurde als alternatives Verfahren eine Hacke mit einer Arbeitsbreite von 2,1 m mit einer Präzisionsspritze ergänzt. Die Einsparung an PSM ist anfangs der Saison gross (bis 90 %), wenn die Salatköpfe klein sind und nimmt dann ab auf ca. 65 %. Im Mittel der Saison ist von Einsparungen in Höhe von 70 % der Fungizid- und Insektizidmengen auszugehen.

Die gleichzeitige Unkrautbekämpfung und der Pflanzenschutz erfordern die Zuteilung der gemeinsamen Kosten auf beide Verfahren. Die gemeinsamen Arbeitserledigungskosten (Traktorkosten und Lohnansatz) werden jeweils hälftig zugeteilt auf die zwei Massnahmen. Die Maschinenkosten der Hacke werden der Unkrautbekämpfung zugeordnet, während die Präzisionsspritze mit angenommenen Anschaffungskosten von 30 000 Franken[9] dem Pflanzenschutzverfahren voll zugerechnet werden. Die Annahmen zur Kalkulation der Maschinenkosten der Präzisionsspritze (Abschreibungszeit, Nutzungsdauer, Reparatur und Unterhalt) orientieren sich an der Präzisionsfeldspritze (Code 5156). Angepasst wurde der Anschaffungspreis, die Auslastung wurde jener der Hacke angeglichen (40 ha) und die Gebäudekosten wurden zwischen beiden Verfahren hälftig aufgeteilt. Um den Einfluss von Änderungen der Auslastung und des Anschaffungspreises zu betrachten, wurden diese variiert, indem eine Auslastung von 100 ha entsprechend der Feldspritze betrachtet wurde und ein Anschaffungspreis von 15 000 Franken zugrunde gelegt wurde.

Die Flächenleistung der Hacke mit Präzisionsspritze von 0,3 ha je Stunde resultiert aus der geringen Arbeitsgeschwindigkeit von 1,5 km/h. Diese im Vergleich mit der Feldspritze geringe Flächenleistung treibt die Traktorkosten und den Lohnansatz in die Höhe, so dass die Kosten dieser zwei Positionen mit insgesamt 118 Fr./ha um 98 Fr. höher sind als im Referenzverfahren mit 20 Fr./ha (vgl. Tabelle 19). Die höheren Traktor- und Arbeitskosten

[9] Der Betrieb, welcher die Hacke einsetzte, konnte keine Preisangabe der Präzisionsspritze machen.

übersteigen damit bereits die Einsparungen an Herbiziden und Insektiziden in Höhe von 89 Fr./ha. Die Kosten der Präzisionsspritze sind dabei noch gar nicht berücksichtigt. Die Verfahrenskosten der Präzisionsspritze sinken erst bei sehr niedrigen Anschaffungskosten von 15 000 Fr. und einer Auslastung von 100 ha auf die Verfahrenskosten der Feldspritze.

Tabelle 19: Vergleich der Verfahrenskosten für eine Fungizid- und Insektizidbehandlung (Mischung) eines Hektars Eisbergsalat: konventionelle Spritze und auf einem Hackgerät montierte Präzisionsspritze mit unterschiedlicher Auslastung und Anschaffungspreis.

	Konventionelle Spritze (15 m)	**Präzisionsspritze auf Hacke (2,1 m)**		
Anschaffungspreis	28'000 Fr.	**30'000 Fr.**		**15'000 Fr.**
Auslastung pro Jahr	100 ha	**40 ha**	**100 ha**	**100 ha**
Kostenberechnung in Fr.				
Abschreibung	1'400 Fr.	3'000 Fr.		1'500 Fr.
Versicherungen u. Gebühren	56 Fr.	123 Fr.		62 Fr.
Weitere Kosten	413 Fr.	286 Fr.		151 Fr.
Summe fixe Kosten jährlich	1'869 Fr.	3'409 Fr.		1'713 Fr.
Reparaturen u. Unterhalt	7 Fr.	5 Fr.		3 Fr.
Summe variable Kosten je ha	7 Fr.	5 Fr.		3 Fr.
Entschädigungsansatz pro ha	**26 Fr.**	**90 Fr.**	**39 Fr.**	**17 Fr.**
Traktorkosten Fr./ha	11.11 Fr.	66 Fr.		
PSM-Kosten, Fr./ha	128 Fr.	38 Fr.		
Lohnansatz (Fr./ha)	9 Fr.	52 Fr.		
Arbeitserledigungskosten inkl. PSM-Kosten je Überfahrt	**173 Fr.**	**247 Fr.**	**195 Fr.**	**173 Fr.**
Flächenleistung (ha/h)	3.58	0.30		

Resultate

Die zwei betrachteten Verfahren zur Einsparung von PSM durch Spot-Spraying beleuchten zwei wesentliche. Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeit neuartiger Verfahren. Die Präzisionsspritze zur punktuellen Bekämpfung von Unkräutern im Zwiebelanbau erfordert die Anschaffung einer zusätzlichen Maschine, da weiterhin auch die Feldspritze für Flächenbehandlungen eingesetzt wird. Zusätzliche Maschinen erhöhen die betrieblichen Maschinenkosten. Da die Präzisionsspritze eine nur leicht geringere Flächenleistung aufweist als die Feldspritze, könnte mittelfristig die Substitution der Feldspritze durch eine Präzisionsspritze eine Option darstellen. Die Wirtschaftlichkeit der Präzisionsspritze hängt dabei von deren Anschaffungskosten und den Kosten der eingesparten PSM ab. Mit weiterer Verbreitung dieser neuen Technologie könnten die Preise sinken. Ebenso würden höhere PSM-Preise die Wirtschaftlichkeit der Präzisionsspritze verbessern.

Beim zweiten betrachteten Verfahren, dem Aufbau einer Präzisionsspritze auf eine Hacke zeigt die Analyse die Bedeutung der Flächen- bzw. Arbeitsleistung auf. Die geringe Flächenleistung des Präzisionsspritzens auf der Hacke erhöht die Traktor- und Arbeitskosten so stark, dass diese Mehrkosten die Einsparungen bei den PSM übersteigen. Eine höhere Flächenleistung würde Traktor- und Arbeitskosten senken und könnte die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens mit PSM-Reduktion verbessern.

Onlinebefragung

Spot-Spraying[10] ist für die drei an der Umfrage teilnehmenden Landwirte eine nützliche Technologie, die die Pflanzen grösstenteils zuverlässig schützt. Sie wird von den Betrieben aber als teuer in der Anschaffung und in der Reparatur sowie aufwendig in der Einarbeitung gesehen. Direktzahlungen für den Einsatz von Spot-Spraying erhält nur ein Betrieb (Abbildung 28). Ein Betrieb empfiehlt Kollegen die Anschaffung, zwei Betriebe nicht. Die drei Betriebe haben sich die Technologie zwischen 2021 und 2024 angeschafft. Die wenigen Betriebe, die die Technologie anwenden, weisen darauf hin, dass Spot-Spraying in der Schweiz noch nicht verbreitet ist.

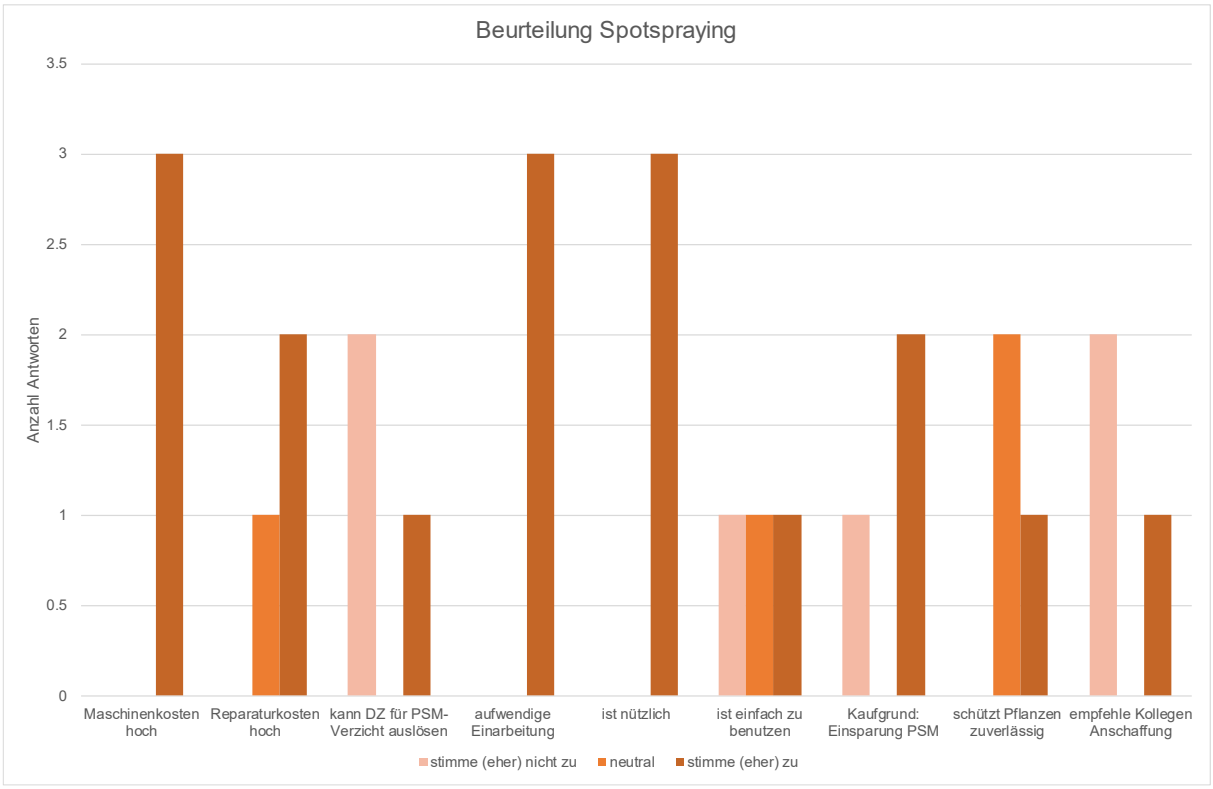


Abbildung 28: Beurteilung von Spot-Spraying durch Gemüsebetriebe im Projekt PFLOPF (n = 3).

Diskussion

Bockholt (2024) berichtet über Herbizid-Einsparungen beim Zwiebelanbau im Umfang von 95 % pro Spritzung, was eine höhere Einsparung darstellt, als im Projekt PFLOPF gemessen wurde. Es wird jedoch nicht angegeben, in welchem Wachstumsstadium sich die Zwiebeln befanden, als dieser Wert gemessen wurde.

Auch das UBA (2024) gibt beim Spot-Spraying in Reihenkulturen im Gemüseanbau und im Grünland ein Einsparpotential an Herbiziden von beinahe 95 % an. Diese Zahl ist jedoch der Durchschnitt der Einsparpotentiale, die die Hersteller der Präzisionsspritzen angeben. Es liegen diesen Einsparungen keine unabhängigen Messungen zugrunde.

Wie im Interview durch einen Landwirt erwähnt, ist ein positiver Seiteneffekt das einfachere Einhalten der Abschwemmungs- und Driftauflagen sowie der Beitrag zu einem positiven Image bei den Konsumenten. Der grosse Nachteil der Präzisionsspritze ist neben den hohen Anschaffungskosten auch die kleine Arbeitsbreite, die mehr Überfahrten und somit eine längere Arbeitszeit bewirkt.

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Spot-Spraying wurde im Projekt von drei Betrieben eingesetzt. Am Projekt haben 10 Betriebe mit Gemüsebau teilgenommen. Somit hat knapp ein Drittel der Betriebe die Technologie eingesetzt. Die Befragung deutet darauf hin, dass auf kleinen Betrieben die Anschaffungskosten, hohe Reparaturkosten und die aufwendige Einarbeitung der

[10] Eine Zuordnung der Aussagen zu den verschiedenen im Projekt angewandten Massnahmen ist möglich. Aufgrund der geringen Zahl Rückmeldungen erfolgt die Darstellung hier zusammen über alle Verfahren.

Anschaffung oder Nutzung einer Spot-Spraying Spritze entgegenstehen. Auf sehr grossen Betrieben oder im überbetrieblichen Einsatz kann eine Präzisionsspritze für Spot-Spraying wirtschaftlich sein. So können PSM präziser eingesetzt werden. Ein Landwirt vertritt die Meinung, dass Spot-Spraying mehr eingesetzt werden würde, wenn Direktzahlungen den Einsatz von Präzisionsspritzen vergünstigen würden. Dies ist im Moment nicht der Fall. Neu ist es für Landwirte jedoch möglich, über die Strukturverbesserungsverordnung Fördergelder bei der Anschaffung zu erhalten (BLW 2025a, BLW 2025b). Gegenwärtig ist Spot-Spraying im Gemüsebau wohl primär ein Gerät für den überbetrieblichen Einsatz sowie auf grösseren Betrieben. In der Blackenbekämpfung dürfen zur Einzelstockbehandlung zugelassene Pflanzenschutzmittel auch mit Präzisionsspritzen eingesetzt werden. Wenn Pflanzenschutzmittel mit hohem Risiko nicht mehr zur Flächenbehandlung, aber zur Behandlung mit Präzisionsspritzen zugelassen wären, könnte dies die Verbreitung von Präzisionsspritzen ebenfalls steigern. Der Einsatz von Präzisionsspritzen könnte Entlastung bringen, da die Zulassung von immer mehr Pflanzenschutzmittelwirkstoffen ausläuft oder sie verboten werden, ohne dass ein Ersatz zur Verfügung steht und dadurch Pflanzenschutzlücken entstehen.

6.9 Bewuchsspezifische Ausbringung von PSM im Obstbau (M4)

Im Obstbau wurden PSM bewuchsspezifisch ausgebracht zum Schutz der Kulturen vor Pilzen und Schadinsekten und zur punktuellen Bekämpfung von Unkraut rund um den Baumstamm.

Laubwandspezifische Ausbringung von PSM

Bei der laubwandspezifischen Ausbringung erkennen an der Spritze montierte Sensoren, ob sich in der Obstanlage ein Baum in der Reihe befindet oder nicht. Ist kein Baum vorhanden, wird kein PSM ausgebracht. Im Projekt wurde insbesondere die Inovel Spritze untersucht, welche mittels LiDAR das Laubwandvolumen bei der Ausbringung berücksichtigt. Die Menge der PSM und der Druck der Spritze werden dann dementsprechend angepasst. Diese Technologie wurden von zwei Betrieben eingesetzt. Während ein Betrieb mit der Technologie beim Einsatz in der Tafelobst-Produktion unter einem Hagelnetz nicht zufrieden war bzw. nicht damit klargekommen ist, nutzt der andere Betrieb die Spritze konsequent für alle Behandlungen in einer Anlage für Mostobst (ohne Hagelschutz). Gemäss den Rückmeldungen wird die Wahrscheinlichkeit der Verbreitung dieser Technologie in der Tafelobst-Praxis aufgrund der dort verbreiteten Hagelschutznetze als gering eingeschätzt. Infolge des Hagelschutzes, der offenbar nicht als Nicht-Obstkultur erkannt wird, sind die Einsparungen an PSM nicht sehr gross. Gegen die weitere Verbreitung spricht ausserdem der hohe Preis der Technologie. Im Mostobst scheint die Technologie ihr Potential zur PSM-Einsparung besser nutzen zu können. Andere Qualitätsanforderungen und Preise bei Mostobst rechtfertigen die Mehrkosten der laubwandspezifischen Ausbringung nicht.

Herbizideinsatz rund um den Stamm

Mithilfe einer Lichtschranke werden Baumstämme detektiert und nur rund um den Stamm werden Herbizide ausgebracht. Das restliche Gras in der Baumreihe muss dann mit einem Mäher gekürzt werden. Diese Massnahme wurde nur von einem Betrieb im Projekt angewendet, der zu seinen Erfahrungen mit diesem Verfahren persönlich interviewt wurde. An der Onlineumfrage nahm dieser Betrieb nicht teil, weshalb die weiteren Aussagen auf der persönlichen Datenerfassung basieren.

Der Betrieb, der die Massnahme umgesetzt hat und für ein Gespräch zu Verfügung stand, würde die Spritzen bedingt weiterempfehlen. Während der Landwirt vorher in einer Überfahrt das Gras zwischen den Baumreihen mulchen und in der Baumreihe spritzen konnte, musste er nun eine zusätzliche Überfahrt machen, um mit dem Fadenmäher das Gras in der Reihe, das nicht vom Herbizid erfasst wurde, zu kürzen. Diese weitere Überfahrt führt zu einem grösseren Arbeitsaufwand und höheren Kosten. Zu den höheren Arbeitskosten kam bei diesem Landwirt noch dazu, dass er den Fadenmäher, den er zum Mulchen in der Reihe benötigte, anschaffen musste. So musste er zwei Investitionen – einmal für die präzisere Spritze und einmal für den Fadenmäher – tätigen. Die höheren Arbeitskosten und die höheren Maschinenkosten können durch das Einsparpotential an Herbiziden nicht kompensiert werden, weshalb eine Wirtschaftlichkeitsanalyse negativ ausfällt. Allerdings sind deutliche Herbizideinsparungen von gut 50 % möglich, die bei grösseren Baumabständen, welche in neuen Anlagen eher vorkommen, noch höher ausfallen können. Bei einem Baumabstand von 2 m sollen Herbizideinsparungen von bis zu 80 % möglich sein. Die

Einzelpflanzenerkennung zur Einsparung von Herbiziden weist eine grössere Praxistauglichkeit als die Inovel Spritze auf. Hürden der Einführung stellen der grössere Arbeitsaufwand und zusätzliche Investitionen dar.

6.10 Sensorgesteuertes Hacken (M5)

Methoden und Daten

Für den Verfahrensvergleich wurde als Referenzverfahren eine Spritze mit 21 Meter Breite zur Ausbringung von Herbiziden im Ackerbau gewählt. Die Landwirte des Projektes hatten drei Möglichkeiten zur Auswahl, wie sie Präzisionshacken anwenden konnten (siehe Tabelle 20). Bei der ersten Möglichkeit wird eine konventionelle Hacke zum Hacken zwischen den Kulturreihen eingesetzt. Der Traktor fährt jedoch mithilfe eines GPS, so dass präziser gefahren werden kann. Die zweite Möglichkeit war die Anwendung einer Hacke, die mit Sensoren zum Hacken zwischen den Reihen ausgestattet war. Für dieses Beispiel wurde ein Scharhackgerät mit Kamerasteuerung gewählt. Das Hacken zwischen den Reihen mit diesen beiden Geräten wurde im Projekt in der Regel mit einer gleichzeitigen Bandspritzung kombiniert. Durch die Teilflächenbehandlung ergibt sich dabei eine Herbizidreduktion. Die dritte Möglichkeit bestand in einer kameragesteuerten Hacke, welche die Zinken einzeln verschiebt und das Hacken innerhalb der Pflanzenreihen ermöglicht. Die Maschinencodes der verschiedenen Maschinen sind in Kapitel 6.18.3.4 dokumentiert.

Tabelle 20: Vergleich von Kennzahlen verschiedener Hackverfahren mit einer konventionellen Spritze.

	Spritze 21 m	**Rübenscharhacke, 6-reihig (zwischen den Reihen) mit GPS-Lenkgerät**	**Scharhackgerät, Kamerasteuerung mit Verschieberahmen, 6-reihig (zwischen den Reihen)**	**Kameragesteuerte Hacke in den Reihen (Variante PFLOPF*)**
Anschaffungspreis in Fr.	39 000 Fr.	Hacke: 14 500 Fr. Bandspritze: 7000 Fr. Lenksystem: 15 500 Fr.	Hacke: 44 000 Fr. Bandspritze: 7000 Fr.	75 000 Fr.
Auslastung in ha	250	60	80	40
Arbeitsleistung	4 ha/h	1,9 ha /h	1,9 ha/h	0,15 ha/h

* In PFLOPF wurde ein Hackgerät eingesetzt, das in der Anschaffung 40 % günstiger ist als im Maschinenkostenbericht.

Es wurden jeweils die Kosten zur Bewirtschaftung von einem Hektar Zuckerrüben und einem Hektar Mais verglichen. Es wurde davon ausgegangen, dass im Referenzverfahren der Zuckerrüben drei Mal Herbizide appliziert werden. Im Mais wird von einer Herbizid-Applikation ausgegangen. Wird eine Herbizidausbringung durch das alleinige Hacken ersetzt wird, muss häufiger gehackt werden, um eine PSM-Applikation effektiv zu ersetzen (Wenzinger, 2025). In der Praxis verbreitet ist eine Bandspritzung, welche durch Hacken ergänzt wird. Durch die Kombination einer Bandspritzung mit Hacken kann die verwendete Menge an PSM reduziert werden. Im Mais ist damit eine Reduktion im Bereich von 40–67 %, in den Zuckerrüben eine Reduktion von 0–67 % möglich (Latsch, 2024; mündliche Quelle). Im Folgenden wird für beide Kulturen von einer Einsparung von 50 % ausgegangen.

Die Arbeitszeit unterscheidet sich zwischen den Verfahren. Zum einen weisen Hacken eine geringere Flächenleistung auf als die Spritze (Tabelle 20). Das Verfahren mit Hacken in der Reihe weist die geringste Flächenleistung auf.

Resultate

In Tabelle 21 sind die Kosten einer Überfahrt mit der jeweiligen Maschine angegeben. Im Referenzverfahren sowie bei den Verfahren mit Bandspritzung fallen Direktkosten für Herbizide an. Laut dem Deckungsbeitragskatalog belaufen sich die mittleren Kosten von Herbiziden in Zuckerrüben pro Applikation für einen Hektar auf 140 Fr. (Vonnez et al., 2024). Da mit dem Hacken auf Herbizide verzichtet wird, fallen bei diesen Verfahren die Herbizidkosten weg. Beim Mais betragen die Kosten für Herbizide im Mittel 120 Fr. pro Hektar (Vonnez et al., 2024).

Bei der Bandspritzung werden 50 % der Herbizidkosten eingespart. Die Kosten für den Traktor sind abhängig von der Flächenleistung, je mehr Zeit die Maschine für die Überfahrt von einem Hektar benötigt, desto höher sind die Kosten. Ein GPS wird nur für die Rübenscharhacke, die von einem Traktor mit GPS gezogen wird, benötigt. Bei den anderen Maschinen fallen somit keine Kosten für ein GPS an. Bei den Maschinenkosten ist die Spritze am billigsten, was an den geringeren Anschaffungskosten und der hohen Auslastung liegt. Die Arbeitszeitkosten sind wie die Traktorkosten ebenfalls von der Flächenleistung abhängig.

Betrachtet man nur eine einzelne Überfahrt, sind die Scharhacke, die von einem Traktor mit GPS gezogen wird, und die Scharhacke mit Kamerasteuerung ohne Bandspritzung infolge der wegfallenden Herbizidkosten günstiger als das Spritzen. Die Maschinen- und die Arbeitszeitkosten pro Überfahrt sind zwar höher, jedoch können Direktkosten für Pflanzenschutzmittel eingespart werden (vgl. Tabelle 21).

Das im Projekt häufig angewandte Verfahren einer Kombination von Hacke mit Bandspritze ist jeweils teurer als das Referenzverfahren. Die Scharhacke mit GPS kostet 35 Fr./ha mehr, die kameragesteuerte Hacke 50 Fr./ha mehr als die Flächenspritzung. Die Einsparung an PSM (Zuckerrüben: 70 Fr./ha, Mais 60 Fr./ha) wird durch die Kosten für die Bandspritze (Fr. 66.- je ha) quasi aufgewogen. Das Hacken in der Reihe unter vollständigem Verzicht auf Herbizide ist aufgrund der hohen Maschinenkosten dieser Hacke und der geringen Flächenleistung und entsprechend hohen Traktor- und Arbeitskosten deutlich teurer (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Kosten verschiedener Hackverfahren für eine Überfahrt von Zuckerrüben. Bei Mais fallen die gleichen Kosten an, allerdings sinken die Direktkosten pro Applikation und Hektar auf 120 Fr.

Kosten in Fr. je Überfahrt bei 1 ha Zuckerrüben (Mais)	Spritze (21m)	Scharhacke mit GPS (zwischen den Reihen)	Scharhacke mit GPS und Bandspritze	Kamera-hacke (zwischen den Reihen)	Kamera-hacke und Bandspritze	Kamera-hacke (in Reihen, 75 kFr.)
Maschinenkosten Traktor	10	21	21	21	21	265
Masch.kosten GPS		5	5	0	0	0
Masch.kosten Spritze/Hacke	20	35	35	55	55	304
Masch.kosten Bandspritze			66		66	
Direktkosten (Mais: 120)	140		70	0	70	0
Arbeitszeitkosten	8	16	16	16	16	207
Summe	**178**	**77**	**213**	**92**	**228**	**776**

Das Direktzahlungsprogramm «Verzicht auf Herbizide» fördert die PSM-Reduktion bei Mais und Zuckerrüben mit 250 Fr./ha. Die Förderung umfasst auch Bandbehandlungen ab der Saat auf maximal 50 % der Fläche. Unter Berücksichtigung dieses Beitrags kann der Herbizidverzicht auf einer Teilfläche wirtschaftlich umgesetzt werden, da die Mehrkosten der kombinierten Hackverfahren mit Bandspritzung kompensiert werden. Die Förderung deckt die höheren Kosten von zwei Überfahrten mit der Hacke (Scharhacke: 2 x 35 Fr./ha = 70 Fr./ha Mehrkosten; kameragesteuerte Hacke zw. Reihen: 2 x 50 Fr./ha = 100 Fr./ha Mehrkosten) wie auch einen eventuell erforderlichen reinen Hackdurchgang.

Onlinebefragung

Laut den neun Befragten besteht der Vorteil einer Hacke, die von einem GPS-gesteuerten Traktor gezogen wird, darin, dass sie nützlich und einfach zu handhaben ist (Abbildung 29). Zudem erhalten die Landwirte teilweise Direktzahlungen durch das Einsetzen der Hacke. Nachteile der GPS-gelenkten Hacke sind in den Augen der Landwirte die hohen Maschinen- und Reparaturkosten und die Einarbeitung in die neue Technologie. Es ist zudem meist schwierig, mit der Hacke alle Spritzungen zu ersetzen. Auch die zehn Landwirte, die eine kameragesteuerte Hacke zwischen den Reihen angewendet haben und die Umfrage beantwortet haben, gaben ähnliche Antworten. Ein Unterschied bestand darin, dass die Kamerahacke weniger einfach zu benutzen ist. In der Reihe wurde nur bei zwei Betrieben gehackt. Auch sie haben ähnliche Meinungen wie die anderen Landwirte, eine verlässliche Aussage ist jedoch aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs schwierig.

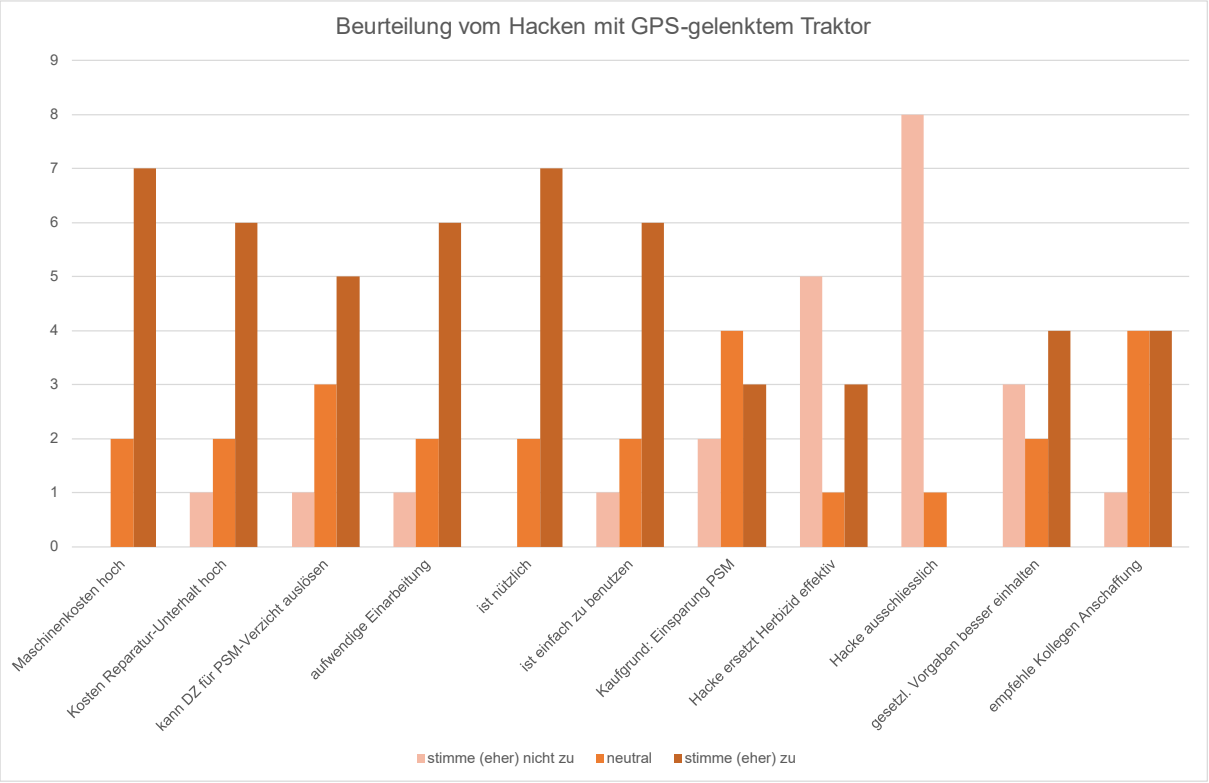


Abbildung 29: Beurteilung des Hackens durch Ackerbaubetriebe im Projekt PFLOPF (n = 9).

Diskussion

Neben den finanziellen Aspekten einer Hacke gibt es noch weitere Aspekte, die beim Gebrauch einer Hacke beachtet werden sollten. Hacken ist nur zu bestimmten Bedingungen möglich. Ist der Boden zum Beispiel zu feucht oder zu trocken, ist Hacken nicht möglich bzw. sinnvoll. Einige Parzellen eignen sich auch aufgrund ihrer Topografie nicht zum Hacken, zum Beispiel kann eine zu grosse Hangneigung oder ein hoher Steinanteil im Boden ein Hindernis für die Hacke darstellen. Zudem ist der Arbeitsaufwand durch die Anwendung von Hacken viel höher, was das Hacken in der Praxis herausfordernd macht (DLG-Ausschuss für Öko-Landbau, 2019).

Eine Herausforderung beim Hacken kann in der Genauigkeit bestehen. Dies kann zu Schäden an den Pflanzen und Ertragseinbussen führen. Laut einem Landwirt kann es besonders bei günstigeren Kamerasteuerungen vorkommen, dass die Reihen nicht richtig gefunden werden und dass sie der Landwirt dann von Hand einstellen muss. So kommt es dann nicht zu der verhofften Arbeitsentlastung. Die Grösse der Kultur und des Unkrauts kann die Benutzung der Hacke ebenfalls einschränken.

Die getroffene Annahme zur Schlagkraft der Hacke ist möglicherweise etwas niedrig angesetzt, da in früheren Arbeiten auf relativ grossen Flächen höhere Arbeitsleistungen von 2,6 ha/h ermittelt wurden (Keiser et al., 2016). Dieses Ergebnis zeigt die Bedeutung der Schlaggrösse für die Arbeitserledigungskosten auf.

Fishkis et al. (2024) haben die Wirtschaftlichkeit verschiedener Verfahren der Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben in Deutschland untersucht. Unter den dortigen Rahmenbedingungen kann der Herbizidverzicht durch Bandspritzung und separates Hacken auch wirtschaftlich sein. In der Analyse werden neben der Wirtschaftlichkeit weitere Umweltparameter wie z. B. die Produktion von Treibhausgasen berücksichtigt. Als Risiko des Herbizidverzichts führen sie die Terminkosten alternativer Verfahren an. Dieser Kritikpunkt betrifft insbesondere das kombinierte Verfahren von Hacken mit Bandspritzung. Idealerweise werden diese Verfahren nicht kombiniert, sondern separat durchgeführt, um eine gute Wirkung der mechanischen wie auch der chemischen Unkrautbekämpfung zu erreichen.

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Der Einsatz von Hacktechniken ist im Vergleich zu Technologien wie Spot-Spraying stärker verbreitet, er hält sich aufgrund der eingeschränkten Praxistauglichkeit bzw. des höheren Arbeitszeitbedarfs jedoch in Grenzen. Hacktechnik kann Herbizide stark reduzieren oder teilweise komplett ersetzen, aber die Wirksamkeit hängt von Bodenart und -feuchte, Wetter und Kultur ab.

Ein Betrieb hat berichtet, er empfand Hacken mit einer Kamerasteuerung vor ein paar Jahren noch als Innovation. Zu dieser Zeit hätten auch viele Betriebe in eine Kamerasteuerung investiert. Als dann aber Jahre mit viel Regen kamen, in denen man die Hacke kaum einsetzen konnte, hatte der Landwirt das Gefühl, dass die Käufe von Hacken zurückgingen. Die Erwartungen der befragten Landwirte zur künftigen Verbreitung der Hacktechnik unterscheiden sich. So ist ein anderer Landwirt der Überzeugung, dass Hacken sich immer mehr verbreiten wird. Entscheidend kann hier der agrarpolitische Rahmen sein. Lenkungsabgaben und andere Massnahmen zur PSM-Reduktion könnten den Einsatz von Präzisionshacken verstärken, da Hacken je nach Kultur ein grosses Einsparpotential aufweist. Die technische Entwicklung kann die Hacktechnik verbessern und könnte zusammen mit einer weiteren Diffusion die Preise sinken lassen.

6.11 Roboterbasiertes Mulchen (M6)

Das roboterbasierte Mulchen wurde im Projekt nur mit einem Roboter, dem Scarabaeus von Brüggli Industries, getestet. Bei diesem handelt es sich um ein weit entwickeltes Pilotgerät mit geringen Einsatzerfahrungen. Daher wurde es nicht regulär in PFLOPF eingesetzt. Da es daher nur begrenzt Praxiserfahrungen und keine Messungen des PSM-Einsparpotentials gibt, wird auf eine Wirtschaftlichkeitsanalyse verzichtet und dafür mehr auf die qualitativen Aspekte des Roboters eingegangen.

Vor- und Nachteile

Die Idee des Scarabaeus ist, dass der Roboter in Obstgärten weitgehend autonom das Gras mulcht. Zumindest in der Baumreihe kann so auf Herbizide verzichtet werden. Um einer Horstbildung um den Stamm herum entgegenzuwirken, braucht es ggf. dort noch eine PSM-Anwendung. In räumlich eingezäunten Bereichen wie Obstgärten wäre ein Roboter gut nutzbar.

In der Praxis war der Roboter allerdings oft über mehrere Wochen in Reparatur, so dass er nur selten eingesetzt werden konnte. Kleine Hindernisse wie heruntergefallene Äpfel wurden für den Roboter schnell zum Problem und auch nasses Gras hinderte ihn daran, seine Aufgabe zuverlässig zu erledigen. Die Flächenleistung war nicht so hoch wie vom Hersteller behauptet (1,5 statt 8 Hektaren in zwei Wochen). Der Scarabaeus musste häufig zur Ladestation zurückkehren und konnte so kaum verwendet werden. Um den Roboter aufladen zu können, muss die Energieversorgung im Obstgarten sichergestellt sein. Das ist mit Solaranlagen möglich, hierbei ist man dann aber stark vom Wetter abhängig. Den Strom vom Betrieb bis zum Obstgarten zu leiten, ist aufwändig.

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Da nur ein Roboter für alle Betriebe zur Verfügung stand, ist nicht klar, wie gross das Interesse an dieser Technologie gewesen wäre. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass der Roboter noch weiter ausreifen muss, bevor er von Obstbauern eingesetzt werden kann. Danach könnte er aber eine attraktive Option darstellen, da der Landwirt in den Obstgärten nicht mehr selber mulchen müsste. So kann Arbeitszeit eingespart werden. Da in der Schweiz der Lohnansatz höher ist als in anderen Ländern, wird verhältnismässig zum Ausland mehr Geld eingespart. Ab einer bestimmten Betriebsgrösse kommt der Scarabaeus aufgrund der geringen Flächenleistung aber nicht mehr nach, weshalb dann in einen zweiten Roboter investiert werden muss. Das zieht dann weitere Kosten nach sich.

6.12 Drohnen (M7)

Methoden und Daten

Als Referenzverfahren zur PSM-Applikation im Rebberg mit der Drohne wurde eine Gebläsespritze (Tankvolumen 200–300 l, Dreipunktanbau) betrachtet, die an einen Schmalspurtraktor montiert ist. Die Codes der Maschinen finden sich in Kapitel 6.18.3.5. Die Gebläsespritze hat laut dem Kostenkatalog eine Auslastung von 50 Hektaren, weshalb die Kosten für die Drohne ebenfalls mit dieser Auslastung berechnet wurde. In einer Variante wurde für die parallele Nutzung von Gebläsespritze und Drohne auch mit einer entsprechend niedrigeren Auslastung von jeweils 25 ha kalkuliert. Diese Variante basiert auf der Rückmeldung aus der Praxis, dass nicht alle Spritzungen mit einer Drohne umgesetzt werden können.

Die meisten Landwirte, die befragt wurden, haben ein Lohnunternehmen beauftragt und konnten deshalb keine Angaben zum Anschaffungspreis der Drohne machen. Es wurde deshalb auf den im Kostenkatalog angegebenen Wert zurückgegriffen. Zusätzlich wurde auf Basis aktueller Marktdaten und der Entwicklung der Drohnenpreise eine günstigere Variante mit Anschaffungskosten von 20 000 Fr. kalkuliert.

Tabelle 22: Auflistung der für eine Gebläsespritze und eine Drohne relevanten Kosten und Annahmen.

	Gebläse-spritze	Drohne (40 kFr.)	Drohne (20 kFr.)	Drohne (20 kFr., geringe Auslastung)
Anschaffungspreis	13'000 Fr.	**40'000 Fr.**	20'000 Fr.	20'000 Fr.
Auslastung pro Jahr	50 ha	50 ha	50 ha	**25 ha**
Abschreibungszeit	12 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre
Kostenberechnung in Fr. pro Jahr				
Abschreibung	975 Fr.	3'000 Fr.	1'500 Fr.	1'500 Fr.
Versicherung u. Gebühren	26 Fr.	80 Fr.	80 Fr.	80 Fr.
Weitere Kosten	181 Fr.	468 Fr.	258 Fr.	258 Fr.
Summe fixe Kosten jährlich	1'182 Fr.	3'548 Fr.	1'838 Fr.	1'838 Fr.
Reparaturen und Unterhalt	11.70 Fr.	7.14 Fr.	3.57 Fr.	3.57 Fr.
Summe variable Kosten je ha	11.70 Fr.	7.14 Fr.	3.57 Fr.	3.57 Fr.
Entschädigungsansatz pro ha	**35.34 Fr.**	**78.10 Fr.**	**40.33 Fr.**	**77.09 Fr.**

Es wird davon ausgegangen, dass für die Verwendung der Drohne keine zusätzliche Maschine benötigt wird. Die Drohne und das Wasser für die PSM-Ausbringung müssen zwar zum Rebberg transportiert werden, die Wegekosten werden bei den Berechnungen aber in beiden Szenarien, also bei der Drohne und bei der Gebläsespritze, nicht berücksichtigt.

Die ökologischen Untersuchungen im Rahmen von PFLOPF haben gezeigt, dass die verwendete Menge an PSM bei beiden Verfahren gleichbleibt. Da die Menge an PSM im Referenzverfahren und bei der Drohne sich nicht verändert, wird dieser Kostenpunkt in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Es wird zudem davon ausgegangen, dass der Ertrag mit und ohne Drohne gleich hoch bleibt. Da mit der Drohne die Traubenzone weniger gut benetzt werden kann, ist in kritischen Phasen der Pflanzenschutz nicht sehr effektiv. Es kann nicht die ganze Saison über mit der Drohne gespritzt werden. In der Praxis werden oft die Hälfte der Spritzungen mit der Drohne, die andere Hälfte aber weiterhin mit der Gebläsespritze durchgeführt. Dies wird bei den Berechnungen in einer separaten Variante miteinbezogen.

Bei der Datenerhebung gaben einige Landwirte an, die PSM könnten mit der Drohne schneller ausgebracht werden, andere sagten, es dauere länger und eine dritte Gruppe sagte, es kommt darauf an, wie gut vorbereitet und geübt der Anwender dabei ist, die PSM-Brühe anzumischen, einzufüllen oder die Akkus der Drohne zu wechseln. In der Onlinebefragung gab die Mehrheit jedoch an, dass die Arbeitszeit gleichbleibt. Auch aufgrund eigener Kalkulationen der Arbeits- und Rüstzeit (Auffüllen des Tanks) sowie Angaben von Lohnunternehmen (Agroline, 2025) gehen wir von einem identischen Arbeitsbedarf bzw. einer identischen Arbeitsleistung für beide Verfahren aus.

Resultate

Unter den getroffenen Annahmen ist die Ausbringung von PSM mit der Drohne im Weinbau mit dem Referenzverfahren Traktor mit Gebläsespritze konkurrenzfähig und sogar leicht günstiger (vgl. Tabelle 23). Eine günstige Drohne mit einem Anschaffungspreis von 20 000 Fr. ist sogar deutlich günstiger. Allerdings wird die ausschliessliche Nutzung der Drohne als nicht ideal erachtet, wie bereits ausgeführt.

Ein kombiniertes Verfahren, welches zum Pflanzenschutz die Gebläsespritze als auch die Drohne nutzt, resultiert in einer geringeren Auslastung der Maschinen, was die Maschinenkosten je Anwendung erhöht. Das kombinierte Verfahren ist mit einer günstigen Drohne dann leicht teurer als das Referenzverfahren (Tabelle 23).

Tabelle 23: Kosten der Verfahren für die Bewirtschaftung von einem Hektar Reben mit Drohne und Gebläsespritze.

1 ha Reben mit jährlich 8 Pflanzenschutzbehandlungen	Traktor mit Gebläsespritze	4 x Spritze, 4x Drohne (20 kFr.) (je 25 ha Auslastung)	Drohne (20 kFr.)	Drohne (40 kFr.)
Maschinenkosten Traktor (Fr.)	439	220	0	0
Maschinenkosten Spritze / Drohne (Fr.)	283	520	320	624
Arbeitsansatz (Fr.)	376	376	376	376
Summe (Fr.)	**1098**	**1116**	**696**	**1000**

In der Praxis fallen bei der Benutzung der Drohne weitere Kosten an. Die Drohne hat zum Beispiel nur einen kleinen Tank, den man mit PSM befüllen kann. Die PSM-Brühe wird meistens in einem grösseren Tank angerührt, der ebenfalls erworben und auf einem Anhänger zum Rebberg transportiert werden muss. Zudem fallen – vorausgesetzt, man fliegt die Drohne selbst – einmalige Kosten von rund 6000 Fr. an (für die Registrierung als Drohnenpilot (10 Fr.), das Zertifikat zum Flug von Drohnen (20 Fr.), die Bewilligung des Betriebs (ca. 4300 Fr.) und Schulung (ca. 1700 Fr.) zum Fliegen von Sprühdrohnen (Hanke, 2025)). Wenn man Software separat zur Drohne kaufen muss, ist das ein zusätzlicher Kostenpunkt. Ein Landwirt hat auch empfohlen, sich einen zusätzlichen Akku zuzulegen.

Die Beauftragung eines Lohnunternehmers ist mit Kosten von 300 Fr./ha ohne PSM je Drohnenbehandlung (LANDI Weinland, 2024) deutlich teurer als die eigene Umsetzung in einem befahrbaren Rebberg. Bei acht Pflanzenschutzbehandlungen ergeben sich jährliche Arbeitserledigungskosten in Höhe von 2400 Fr./ha. In nicht fahrbaren Lagen kann die Drohne allerdings eine Alternative darstellen, insbes. zur Ausbringung von PSM mit der Schlauchspritze.

Onlinebefragung

Alle drei Landwirte, die die Umfrage ausgefüllt haben, sind sich einig, dass Drohnen nützlich sind. Bei der Zuverlässigkeit und der Verminderung der Abdrift sind sich die Landwirte nicht mehr ganz einig, die Mehrheit stimmt diesen Aussagen jedoch zu. Auch würde der Landwirt, der ein Lohnunternehmen für die PSM-Applikation durch eine Drohne beauftragt, seinen Kollegen die Anschaffung empfehlen. Die Landwirte, die eine Drohne gekauft haben, stimmen der Aussage jedoch weder zu, noch lehnen sie sie ab. Eher verneinend stehen die Landwirte der Aussage gegenüber, dass man mit der Drohne alle Spritzungen durchführen kann. Es sind also weiterhin Applikationen mit der Spritze notwendig. Über die weiteren Aspekte der Drohnenbenutzung lassen sich keine fundierten Aussagen machen, da nur ein Landwirt die weiteren Fragen ausgefüllt hat. Bei der Frage, ob die Landwirte Kollegen empfehlen würden, ein Lohnunternehmen mit der PSM-Applikation durch eine Drohne zu beauftragen, gab jeder Landwirt ein anderes Ergebnis an, so dass hier kein eindeutiges Fazit möglich ist.

Diskussion

Drohnen erlauben Spritzungen aus der Luft, was ihren Einsatz insbesondere in schwierig befahrbaren Reblagen, wie Terrassen oder Steillagen, interessant macht. In diesen Lagen ist eine Pflanzenschutzbehandlung in der Regel sehr zeit- und kostenintensiv. Hier bietet der Einsatz einer Drohne Vorteile wie eine hohe Schlagkraft und einen erhöhter Anwenderschutz im Vergleich zu anderen Verfahren und kann auch kostengünstiger sein.

Bei der Ausbringung von PSM mit der Drohne erfolgt die Ausbringung aus der Luft in Richtung Boden. Beim Spritzen mit einer Gebläsespritze erfolgt die PSM-Ausbringungen horizontal. Die Applikationstechnik stellt bei der Ausbringung mit der Drohne eine Herausforderung dar, da die Trauben und die Blattunterseite durch die Drohne weniger gut benetzt werden. Die Rotoren der Drohne erzeugen zwar einen vertikalen Luftstrom, dieser kann aber insbesondere im Falle einer starken Belaubung zu schwach sein, um die Blätter und Trauben vollständig zu benetzen. Durch die schlechtere Benetzung kann die Wahrscheinlichkeit einer Pilzinfektion und Ertragsreduktion ansteigen. Diese qualitativen Aspekte werden in der Berechnung ausgeklammert, spielen in der Praxis jedoch eine Rolle.

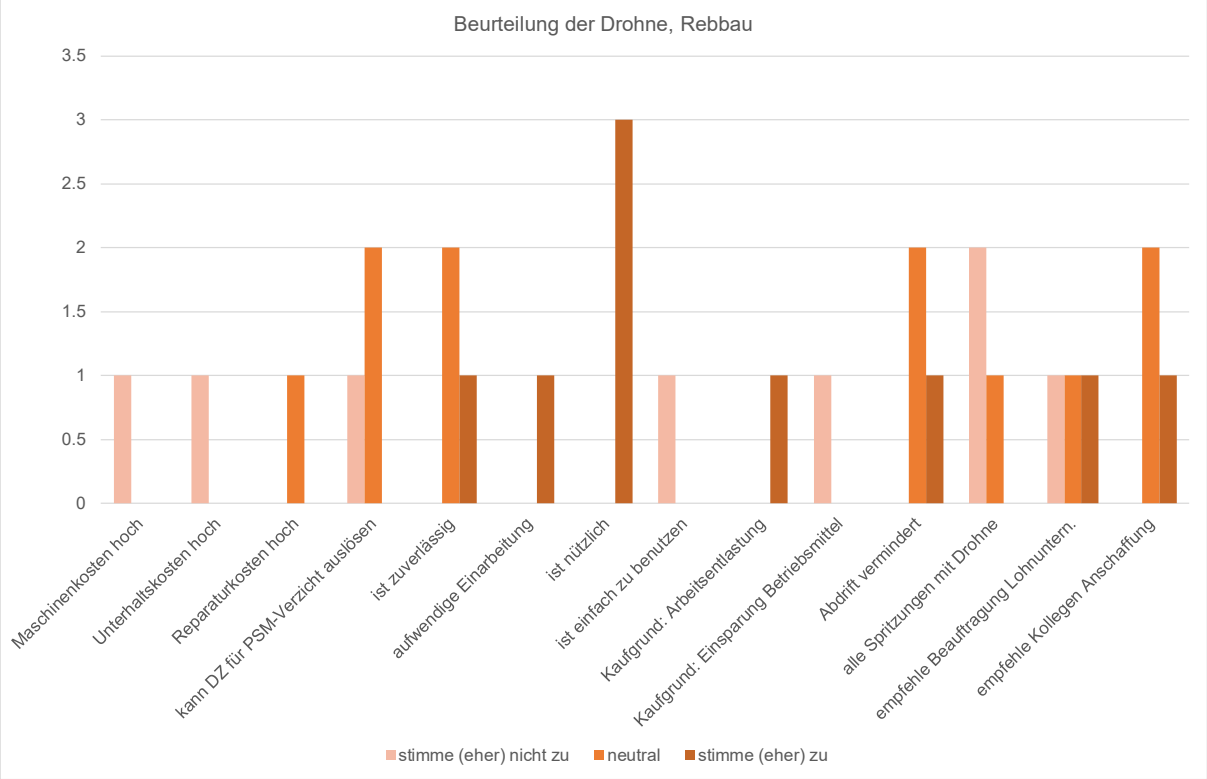


Abbildung 30: Beurteilung von Drohnen durch Rebbaubetriebe im Projekt PFLOPF (n = 3).

Weitere Aspekte

Drohnen haben im Rebbau Einsatzvorteile unter gewissen Bedingungen, bringen aber auch Nachteile mit sich. Einige Stellen in Rebbergen sind mit dem Traktor befahrbar, bei anderen Lagen ist die Durchfahrt noch mit einem Raupenfahrzeug möglich und in Weinbergterrassen ist die PSM-Applikation von Hand oder per Helikopter verbreitet. Eine weitere Möglichkeit stellt das Ausbringen der PSM mit der Drohne dar. So wird im Vergleich zum Ausbringen mit einer Schlauchspritze Arbeitszeit eingespart. Zudem ist der Drohnenpilot dem PSM weniger ausgesetzt als bei der Ausbringung von Hand oder mittels Raupe. Es entsteht auch weniger Lärm und es wird weniger Energie benötigt als bei anderen Verfahren.

Tests, bei denen die seitliche Windgeschwindigkeit gemessen wurde, um das Abdriftrisiko zu bestimmen, haben gezeigt, dass die Abdrift bei Drohnen im Vergleich zu einer Gebläsespritze verringert ist (Dubuis et al., 2024). Bei einer Gebläsespritze werden die Reben jedoch von der Seite gespritzt. Bleibt ein versprühter Tropfen nicht an der ersten Reihe hängen, wird die Abdrift durch benachbarte Reihen weiter reduziert. PSM geht somit nur verloren, wenn es im Gras oder nicht mehr im Rebberg landet. Mit der Drohne wird von oben gesprüht. Wenn ein Tröpfchen PSM nicht in der Rebe landet, endet es im Gras. Somit können beim Drohneneinsatz mehr PSM im Nicht-Zielbereich landen als mit der Spritze vom Boden aus (Gölles, 2024; mündliche Quelle). Im Vergleich zu einer konventionellen Spritze werden die Blätter und die Trauben auch weniger gut mit PSM bedeckt (Gölles, 2024; mündliche Quelle), was vor allem mit zunehmender Laubwand ein Problem darstellen kann. Einige Winzer spritzen deshalb nach eigener Aussage die erste Hälfte der Saison mit der Drohne und wechseln in der zweiten Hälfte auf die Gebläsespritze.

Drohnen dürfen nicht über öffentliche Strassen geflogen werden. Die Weinberge eines Betriebes sind meist nicht arrondiert oder eine Strasse trennt zwei Seiten eines Rebberges. Wenn die Drohne dann jedes Mal gelandet, zusammenklappt, auf den Anhänger geladen und zum nächsten Weinberg gefahren werden muss, kostet dies Zeit. Eine weitere Hürde für die Anschaffung einer Drohne besteht darin, dass zuerst eine Prüfung für den Pilotenschein gemacht werden muss. Viele Landwirte erachten den Pilotenschein als zu aufwändig, weshalb eher ein Lohnunternehmen beauftragt wird. Da stellt sich aber wieder die Schwierigkeit, dass meistens viele Landwirte

gleichzeitig eine Drohne benötigen, da auch das Infektionsrisiko in einer Region zu ähnlichen Zeiten ansteigt. Das verursacht Terminkosten[11].

Einfluss des Projektes PFLOPF und Ausblick

Im Projekt haben fünf Winzer eine Drohne eingesetzt, die meisten davon haben ein Lohnunternehmen beauftragt. Als Grund wurde häufig angegeben, dass sich die Technik der Drohnen noch stark entwickelt und die Drohnen noch stark an Leistung zunehmen. In ein paar Jahren wird die Investition in den Kauf einer Drohne dann eventuell attraktiver. Dass die Winzer noch sehr zurückhaltend mit einem Kauf sind, weist auch sicherlich auf die vielen Hürden wie die Pilotenprüfung hin, die einen starken Einfluss auf die Kaufentscheidung haben. Bisher vertrauen aber auch nur wenige Winzer darauf, dass ausschliesslich die Drohne für den Pflanzenschutz verwendet wird und die übliche Gebläsespritze komplett ersetzt werden kann.

6.13 Wahrnehmung der Landwirte von Precision Farming

Beim Ausfüllen der Onlineumfrage wurden die Landwirte bei jeder Massnahme befragt, wie hoch sie deren PSM-Reduktionspotential einstufen. Im Vergleich mit den im Projekt in Versuchen erhobenen eingesparten Mengen (Latsch, 2024, mündliche Quelle) fällt auf, dass das Einsparpotential des Lenksystems und der Teilbreitenschaltung durch die Landwirte über-, das Potential von Spot-Spraying und vom Hacken hingegen unterschätzt werden (Tabelle 24). Die ersten beiden Technologien wurden im Rahmen des Projekts häufiger verwendet.

Tabelle 24: Vergleich der angenommenen zu den im Projekt ermittelten und für die Analyse verwendeten Einsparungen der verschiedenen PFLOPF Massnahmen.

Massnahme	Geschätztes Einsparpotential (Median)	Gemessenes und kalkuliertes Einsparpotential
M2 Lenksysteme	6,5 %	1,5 %
M3 Teilbreitenschaltung	5 %	4 %
M4 Bewuchsspezifische Ausbringung im Gemüsebau	20 %	70 % Fungizid- und Insektizideinsatz in Eisbergsalat 85 % Herbizidbehandlung Zwiebeln
M5 Sensorgesteuertes Hacken	25 %	50 % im Mais, 50 % bei Zuckerrüben

Quellen: Geschätztes Einsparpotential – Befragung der PFLOPF-Betriebe; Einsparpotential im Projekt – Latsch, 2024.

Die Landwirte überschätzen somit das Potential der leichter in den Arbeitsablauf zu integrierenden und kostengünstigeren Massnahmen. Bei den kostenintensiveren Massnahmen scheint den Landwirten nicht bewusst zu sein, wie viel PSM mit den Technologien eingespart werden könnten. Diese Wahrnehmung könnte auch ein Grund sein, weshalb diese Technologien im Projekt nicht so häufig eingesetzt wurden.

6.14 Fazit

Prognose- und Monitoringsysteme

Diese Systeme weisen eine starke Variation in der Nutzung zwischen den Betriebszweigen auf. Im Reb- und Obstbau sind sie recht etabliert, im Acker-, und Gemüsebau werden Prognosesysteme weniger intensiv, teils nur wenig gebraucht. Der generelle Vorteil von Prognosesystemen, dass sie berechnen können, wann der beste Zeitpunkt zum Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln ist, wird durch die Herausforderungen der mangelnden Nutzerfreundlichkeit und teils zu geringen Zuverlässigkeit gemindert. Durch die geringe Nutzerfreundlichkeit stellt auch der Zugang zu den Informationen ein Problem dar.

Es ist in der Praxis oft nicht möglich, genau dann zu spritzen, wenn das Prognosesystem es vorgibt. Wenn das Wetter zum Beispiel oft schlecht ist, geht man einfach dann aufs Feld, wenn das Wetter es zulässt, auch wenn man laut dem Modell noch länger warten könnte.

[11] Terminkosten im Pflanzenschutz sind Kosten, die durch zeitkritische Arbeiten entstehen. In der Landwirtschaft müssen bestimmte Massnahmen in einem engen Zeitfenster durchgeführt werden, um optimale Erträge zu sichern und Schäden zu vermeiden. Diese zeitlichen Restriktionen führen zu spezifischen Kosten, die als Terminkosten bezeichnet werden.

Im Gemüsebau ist der Bedarf an Prognosesystemen hoch, das Angebot jedoch sehr überschaubar. Wären für diesen Betriebszweig mehr Systeme verfügbar, würde man mehr verwenden können. Eine Möglichkeit wäre hier, Modelle aus dem Ausland für die Schweiz anzupassen und zu verwenden (Dachbrodt-Saaydeh und Golla, 2013). Aus Sicht der Betriebsleiter gibt es bei Prognosesystemen Optimierungspotenzial (z. B. deren Programmierung). Die Einbindung betriebseigener Wetterstationen ist auf jeden Fall von Vorteil, da die Aussagekraft der Prognosen verbessert wird. In der Zukunft könnte die Bedeutung von Prognosesystemen zunehmen, da der Klimawandel immer extremere Wetterereignisse hervorruft, die von den Systemen vorhergesagt werden können (Weigand, 2021).

Lenksysteme

Lenksysteme sind schon recht verbreitet (Rath-Kampe, 2016). Fast jeder Landwirt gibt in der Onlineumfrage an, seinen nächsten Traktor mit einem integrierten Lenksystem zu kaufen. Zahlen von unabhängigen Quellen, die die Entwicklung der Verkaufszahlen der Lenksysteme belegen, gibt es jedoch nicht. Obwohl die Anschaffungskosten von den Landwirten als hoch beurteilt werden, sind die Arbeitsentlastung sowie die genauere Feldbearbeitung so grosse nicht-monetäre Vorteile, dass sich eine Investition für die Landwirte lohnt, auch wenn auf kleineren Betrieben finanziell kein Vorteil entsteht. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Systeme aufgrund des Komforts bei der Arbeit weiterhin verbreiten werden (Groher et al., 2020). Mit zunehmender Verbreitung dieser Technologie ist auch von entsprechend zunehmenden PSM-Einsparungen auszugehen.

Teilbreitenschaltung

Teilbreitenschaltungen sind weniger verbreitet als Lenksysteme, doch auch diese Technologie verbreitet sich immer mehr, da den Landwirten das Potential der Arbeitsentlastung bekannt ist und sie davon Gebrauch machen wollen. Die Investition in eine Teilbreitenschaltung ist unter Berücksichtigung der Einsparungen an Betriebsmitteln für grosse Ackerbaubetriebe wirtschaftlich. Berücksichtigt man zusätzlich die positiven Effekte auf die Arbeitsanforderungen, ist diese Technologie auch für einen durchschnittlich grossen Ackerbaubetrieb wirtschaftlich attraktiv. Es ist davon auszugehen, dass sich die Teilbreitenschaltung künftig stärker verbreiten wird. Ihr Einsatz könnte durch stärkere Vorgaben zum Schutz von Wegen, Gewässern etc. auch für kleinere Betriebe attraktiver werden.

Bewuchsspezifische Ausbringung von PSM

Spot-Spraying ist eine vielversprechende Precision Farming Technologie, über deren Anschaffung viele Betriebe schon nachgedacht haben. Es gibt auch einige Betriebe, welche diese Technologie schon eingesetzt haben. Trotzdem ist der Einsatz im Rahmen des Projektes PFLOPF recht begrenzt, was darauf zurückzuführen ist, dass einerseits die praxistauglichen Geräte erst in den letzten beiden Projektjahren auf den Markt kamen und andererseits die Kosten hoch sind. Präzisionsspritzen zur Einzelpflanzenbehandlung kosten teilweise über 140 000 Franken und für durchschnittlich grosse Betriebe lohnt sich eine Investition nicht. Die hohen Anschaffungskosten sind wohl auch der Grund, weshalb die Technologie vorwiegend auf grossen Gemüsebetrieben (hohe Wertschöpfung) oder von Lohnunternehmen (genügend hohe Auslastung) eingesetzt wird. Um einen stärkeren Einsatz zu fördern, müssten die Geräte preisgünstiger oder der überbetriebliche Einsatz vereinfacht werden.

Im Obstbau finden sich hier zwei Technologien für das Sprühen. Diese Technologien wurden selten eingesetzt. Wird die gesprühte Menge dem Volumen der Laubwand angepasst, führt das in Anlagen mit Hagelschutz kaum zu Einsparungen. Der Einsatz in einer Mostobstanlage lieferte bessere Ergebnisse, allerdings sind die hohen Anschaffungskosten eine Hürde. Die punktuelle Ausbringung von Herbiziden um den Baumstamm statt in der gesamten Reihe kann den Herbizideinsatz reduzieren, allerdings ist der Arbeitsaufwand höher, da man das Gras in der Reihe zwischen den Bäumen mähen muss und es sind zusätzlich Investitionen für ein kombiniertes mechanisch-chemisches Verfahren erforderlich.

Sensorgesteuertes Hacken

Auf den Betrieben, die das sensorgesteuerte Hacken in Kombination mit einer Bandspritzung zur Unkrautbekämpfung angewendet haben, kamen mehrere Arten von sensorgesteuerten Hacken zum Einsatz. Die Kosten der Geräte unterscheiden sich dabei stark.

Technisch einfachere Verfahren zum Hacken zwischen den Reihen weisen zwar eine geringere Flächenleistung auf als der ganzflächige Herbizideinsatz und sind trotz Herbizideinsparung kostenintensiver. Dank der Beiträge für den Herbizidverzicht ist der Einsatz dieser Technologie in Mais und Zuckerrüben jedoch wirtschaftlich umsetzbar. Die

kombinierte chemisch-mechanische Unkrautbekämpfung mit Hacken könnte dank dieser Anreise künftig stärker eingesetzt werden. Die Attraktivität könnte weiter zunehmen – durch die Politik in Form von Direktzahlungen oder Lenkungsabgaben oder durch den Markt in Form von Prämien oder wenn die Verfügbarkeit und Einsatzmöglichkeiten von Herbiziden sich ändern.

Roboterbasiertes Mulchen

Das roboterbasierte Mulchen befindet sich noch in einem frühen Stadium der Entwicklung, was sich in den vielen Problemen in der Praxis zeigte. Der Roboter fiel für längere Zeit aus und konnte nicht mehr verwendet werden. Wird der Roboter weniger störungsanfällig und wird die Flächenleistung höher, könnte der Roboter sich besser für das Mulchen eignen.

Drohnen

Drohnen können ihre Vorteile im Weinbau vor allem in Steil- und Terrassenlagen ausspielen, da dort das Ausbringen von PSM bislang sehr aufwändig und kostenintensiv ist. Mit einer Drohne ist aber die Benetzung der Trauben mit PSM weniger optimal, weshalb in fahrbaren Lagen bei anhaltend feuchter Witterung oftmals nur die Hälfte der Spritzungen mit der Drohne durchgeführt werden und die andere Hälfe der Spritzungen mit der Gebläsespritze erfolgen sollte. PSM kann nicht oder nur wenig eingespart werden, weshalb die grössten Vorteile des Drohneneinsatzes im besseren Anwenderschutz (Abstand zum Sprühnebel, verringerte Unfallgefahr) und in der höheren Flexibilität (Befahrbarkeit, Schlagkraft) bestehen. Auch eine Arbeitsentlastung ist möglich, da der Landwirt nicht mehr selbst durch den Weinberg fahren oder gehen muss, sondern die PSM vom Rand ausbringen kann. Ob sich der Einsatz einer Drohne wirtschaftlich lohnt, hängt wesentlich von den spezifischen Gegebenheiten des Betriebs und dem Umfang der nicht oder nur schwer zu befahrenden Rebflächen eines Betriebes ab.

6.15 Entwicklungsstand je nach Betriebszweig

Im Projekt PFLOPF haben die **Ackerbau**betriebe viele Precision Farming Technologien angewendet, der Einsatz ist aber vor allem bei den teureren Technologien wie Spot-Spraying oder Hacken in den Reihen zurückhaltend. Das liegt daran, dass der Umsatz im Ackerbau im Vergleich zum Gemüsebau viel geringer ist und weniger von Hand gejätet wird. So lohnt sich die Investition in neue Technologien nicht, zumal Precision Farming Technologien oft als Ergänzung zu bestehenden Maschinen und nicht als Ersatz für diese dienen.

Im **Gemüsebau** ist die Entwicklung in Richtung Precision Farming am weitesten vorangeschritten. Einerseits haben viele Betriebe parallel eine ÖLN- und eine Bio-Produktion. Da in der Bio-Produktion in der Reihe viel von Hand gejätet wird, sind entsprechende Maschinen bereits vorhanden. In der Schweiz sind die Stundenlöhne recht hoch, wodurch mit schon einer kleinen Reduktion der Arbeitszeit viel Geld gespart werden kann. Die Entwicklung von PSM-Resistenzen, Vorgaben der Abnehmer wie «maximale Anzahl an PSM-Wirkstoffen, die Rückstände haben» und der Rückgang an zugelassenen PSM-Wirkstoffen wirken ebenfalls in die Richtung des teilflächenspezifischen Einsatzes oder des Ersatzes von PSM. Der Gemüsebau hat auch viel Potential, als Absatzmarkt für Precision Farming Technologien noch weiter zu wachsen.

Der **Obstbau** weist gegenwärtig nur ein kleines Angebot an Precision Farming Technologien auf. Diese wenigen Technologien wurden auch kaum eingesetzt. Im Fall der Inovel-Spritze mit LiDAR-Sensoren zur Laubwanddetektion liegt das neben den hohen Anschaffungskosten auch am erhöhten Aufwand für die Bedienung und der eher geringen Einsparung an PSM. Die Nutzung einer Punktspritze bietet Potential zur PSM-Reduktion, jedoch ist dieses Verfahren mit einem höheren Arbeitsaufwand verbunden.

Auch im **Rebbau** ist das Angebot an Precision Farming Technologien, abgesehen von der Drohne für die Pflanzenschutzausbringung, gering. PSM konnten mit Drohnen nicht eingespart werden, in Steillagen kann diese Technologie allerdings interessant sein. Neue Entwicklungen wären erwünscht, jedoch ist bei vielen Geräten die nötige Auslastung nicht gegeben, da Ostschweizer Weinbetriebe häufig klein sind und ein überbetrieblicher Einsatz mit einem grossen Koordinationsaufwand verbunden ist.

6.16 Lernfragen

Im Projektgesuch wurden drei Lernfragen formuliert, die durch die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Precision Farming Technologien beantwortet werden sollen. Die Fragen lauten:

- Welche Kosten werden durch den Einsatz von Precision Farming Technologien verursacht?
- Welcher Nutzen entsteht aus dem Einsatz von Precision Farming Technologien?
- Welches Kosten-Nutzen-Verhältnis besteht?

6.16.1 Kosten von Precision Farming

Durch den Einsatz von Precision Farming Technologien entstehen zwei Arten von Kosten: Kosten finanzieller Natur und Kosten, die sich monetär nicht messen lassen. Durch den Einsatz von Precision Farming Technologien sind die Anschaffungskosten in der Regel höher als bei Maschinen ohne diese Technik. Die Reparaturkosten blieben laut den Befragungen der Landwirte im Vergleich zu ihren Referenzverfahren während der Laufzeit des Projektes ungefähr gleich. Es kann aber sein, dass die Reparaturkosten mit zunehmendem Alter der Technologien stärker ansteigen als die Reparaturkosten der Referenzverfahren, da die neuen Technologien mehr Elektronik enthalten und somit anfälliger für Störungen sind. Die Wetterstationen und der Mulchroboter bilden hierbei eine Ausnahme, da sie während der Projektlaufzeit über längere Zeit gewartet werden mussten. Die Arbeitszeit steigt mit gewissen Technologien wie zum Beispiel dem Hacken an. Die höheren Kosten der neuen Technologien stellen eine Hürde für einen stärkeren Einsatz von Precision Farming Technologien dar (Giagnocavo et al., 2025).

Der Landwirt muss sich in eine neue Technologie einarbeiten, bevor er sie verwenden kann. Auf diesen Punkt wurde in der Onlinebefragung und in der Datenerhebung mehrfach aufmerksam gemacht. Wenn zu Beginn noch nicht alles reibungslos funktioniert, kann das Zeit und Nerven kosten. Die neue Technologie kann auch so kompliziert sein, dass nicht mehr alle Mitarbeitenden die Maschine bedienen können und zuerst neu instruiert werden müssen.

Die Kosten der Nutzung von Precision Farming liegen bei gewissen Systemen wie Lenksystemen, Teilbreitenschaltungen oder Drohnen im Bereich herkömmlicher Technologien. Bei anderen Technologien sind die Kostenunterschiede zu den Referenzverfahren sehr hoch, z.B. beim Spot-Spraying, welches gleichzeitig ein hohes PSM-Reduktionspotential aufweist. Dies schränkt die weitere Verbreitung von Precision Farming Technologien und damit auch das Potential, PSM einzusparen, ein. Eine Neubeurteilung der Kostensituation ergäbe sich, wenn z. B. PSM mit höheren Risiken nur noch mit risikomindernden Spot-Spraying Technologien ausgebracht werden dürften oder wenn PSM aufgrund einer Lenkungsabgabe wesentlich teurer werden würden oder ein Technologieeinsatz über Direktzahlungen gefördert werden würde.

6.16.2 Nutzen von Precision Farming

Der grösste Vorteil der betrachteten Precision Farming Technologien ist die Ersparnis an Direktkosten, meistens PSM. Bei Lenksystemen kann auch Düngemittel, Saatgut und Arbeitszeit eingespart werden. Durch die Verwendung von Lenksystemen und Teilbreitenschaltungen können Pflanzenschutzmittel und bei Lenksystemen auch weitere Betriebsmittel gleichmässiger ausgebracht werden. So reift der Bestand gleichmässiger und die Qualität und die Quantität des Ertrags können ansteigen (Feiffer Consult, 2024; Aussagen der Landwirte).

Ausserdem ist die Arbeitsentlastung ebenfalls ein wichtiger Punkt, der häufig in Gesprächen als grosser Vorteil neuer Technologien genannt wurde. Man muss sich bei den Arbeiten weniger konzentrieren oder man kann seine Konzentration anderen Aspekten der auszuführenden Arbeit widmen. Am Ende der Arbeit ist man zudem weniger müde.

Bei persönlichen Gesprächen wurde auch darauf aufmerksam gemacht, dass Precision Farming das Image der Landwirtschaft verbessert. Wenn ein Lohnunternehmen mit einem Lenksystem in gerader Linie sät, sieht das schön aus und der Landwirt wird das Lohnunternehmen wieder einmal beauftragen. Auch die Bevölkerung, die nicht in der Landwirtschaft tätig ist, ist Bauern gegenüber freundlicher gestimmt, wenn sie sieht, dass Pflanzenschutzmittel nur wo nötig ausgebracht werden. Mehr als die Hälfte der Bevölkerung, die nicht in der Landwirtschaft tätig ist, weiss nicht, dass Roboter in der Landwirtschaft eingesetzt werden können. Wenn sie das aber erfahren, sind sie dieser Idee positiv gestimmt und zeigen grosses Interesse (Zeddies, Busch und Qaim, 2024).

Die Abdrift kann durch das präzisere Ausbringen ebenfalls reduziert und Vorgaben bezüglich des Einsatzes und dem Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln einfacher eingehalten werden. Im Ackerbau ist es in den Zuckerrüben und in den Kartoffeln auch möglich, Unkräuter mit einer Einzelpflanzenerkennung zu behandelt. Auch im Gemüsebau kann durch den Einsatz einer Spritze mit Einzelpflanzenerkennung PSM eingespart werden. Mit der Behandlung von Kulturen mit einer Einzelpflanzenerkennung ist es möglich, Direktzahlungen zu erhalten. Neuerdings wird die Anschaffung von Feldrobotern im Rahmen der Strukturverbesserungsverordnung (SVV) finanziell unterstützt (BLW 2025a, BLW 2025b). Produktionssystembeiträge zum Verzicht auf Herbizide bieten den Betrieben monetäre Anreize, ihren Herbizideinsatz zu verringern. Precision Farming Technologien kommt dabei eine wesentliche Rolle zu.

6.16.3 Kosten-Nutzen-Verhältnis

Der Einsatz von Precision Farming Technologien kann wirtschaftlich sein und zur PSM-Reduktion beitragen. Wesentlicher Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit ist dabei die Auslastung der Geräte. Die Auslastung wird wesentlich von der Ackerfläche bzw. der Betriebsgrösse bestimmt. Im Ackerbau sind auf einem mindestens durchschnittlich grossen Betrieb mit 32,5 ha offener Ackerfläche ein Lenksystem, die Teilbreitenschaltung und auch das Hacken zwischen den Reihen (mit den Beiträgen zum Verzicht auf PSM) wirtschaftlich umsetzbar. Im Rebbau kann in Abhängigkeit von der Befahrbarkeit der Rebflächen eine Drohne auch wirtschaftlich eingesetzt werden. Bei den übrigen Precision Farming Verfahren fiel die Wirtschaftlichkeitsanalyse unter den angenommenen Betriebsgrössen und Auslastungen negativ aus. Da bei den Prognosesystemen und dem Mulchroboter keine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt wurde, ist dort kein abschliessendes Fazit möglich. Vermutlich würde sich der Mulchroboter aber nicht lohnen. Die Prognosemodelle, die Gelbschalen und die Wetterstationen wurden von den Landwirten mit einem positiven Kosten-Nutzen-Verhältnis bewertet, was darauf schliessen lässt, dass sich diese Technologien lohnen würde.

Der Ertrag wurde im Projekt PFLOPF aufgrund zu stark eingeschränkter Möglichkeiten für den Aufbau eines entsprechend geeigneten Versuchsdesigns nicht gemessen, weshalb keine präzise Aussage darüber möglich ist, ob der Einsatz der neuen Technologien einen Einfluss auf den Ertrag hat. Einige Landwirte gaben jedoch während der Datenerfassung an, dass sich der Ertrag durch die Verwendung von Precision Farming erhöht hat. Beim Einsatz von GPS ist dies plausibel, da die genauer angelegten Fahrgassen ermöglichen, dass kein Streifen des Feldes nicht besät wird und durch eine gleichmässige Flächenausnutzung der Ertrag steigt. Bei der Teilbreitenschaltung ist es nach Aussagen der Landwirte möglich, dass die Menge und die Qualität des Ertrags ansteigen, da PSM gleichmässiger ausgebracht werden und die Pflanzen damit besser geschützt werden.

Direktzahlungen erhalten die Landwirte für den Einsatz von Precision Farming Technologien nach eigener Aussage eher selten. Beim Hacken können Beiträge zum Verzicht auf Herbizide ausgelöst werden. Bis 2024 erhielten Landwirte in bestimmten Anwendungsfällen Ressourceneffizienzbeiträge für den Einsatz von präziser Applikationstechnik. Diese wurden im Direktzahlungssystem durch technologieunabhängige Produktionssystembeiträge ersetzt. Vergleicht man die Anschaffungskosten der verschiedenen Technologien (Tabelle 25), fällt auf, dass der Anschaffungspreis neuer Technologien sehr hoch sein kann. Die Teilbreitenschaltung hat relativ geringe Anschaffungskosten. Die Präzisionsspritze mit Einzelpflanzenerkennung, die für Spot-Spraying eingesetzt wurde, ist die Technologie mit den höchsten Anschaffungskosten. Beim Einsparpotential ist der Vergleich der Technologien nicht so einfach, da unterschieden werden muss, wann Düngemittel, Saatgut und PSM, wann nur PSM (Herbizide, Fungizide, Insektizide) und wann nur Herbizide eingespart werden können. Auch ein Vergleich in Franken, die eingespart werden können, ist nicht sinnvoll, da sich die verwendeten PSM in ihren Kosten unterscheiden.

Tabelle 25: Vergleich der Anschaffungskosten und des Einsparpotentials der verschiedenen Precision Farming Technologien.

Massnahme	Anschaffungspreis	PSM-Einsparpotential
M1: Prognosesysteme	Nicht Bestandteil dieser Untersuchung	Nicht Bestandteil dieser Untersuchung
M2: Lenksysteme	15 500 Fr.	1,5 % aller Betriebsmittel
M3: Teilbreitenschaltung	5000 Fr.	4 % an PSM
M4: Spot-Spraying	142 000 Fr.	70 bzw. 85 % an PSM
M4: Laubwandspezifische Ausbringung von PSM und Einzelpflanzenerkennung	-	-
M5: Sensorgesteuerte alternative Unkrautregulierung	Kameragesteuerte Hacke zwischen den Reihen: 44 000 Fr. Kameragesteuerte Hacke in der Reihe: 75 000 Fr.	Zuckerrüben: 50 % an Herbiziden Mais: 50 % an Herbiziden
M6: Roboterbasierte alternative Unkrautregulierung	-	-
M7: Drohnen	40 000 Fr.	0 %

Ausbildung und Weiterbildung stellen zentrale Voraussetzungen für die erfolgreiche Einführung von Precision Farming Technologien dar. Sie tragen dazu bei, technologische und ökonomische Zugangshürden zu senken, indem sie betriebliches Fachwissen, digitale Kompetenzen und wirtschaftliche Bewertungskompetenz vermitteln. Dadurch können Unsicherheiten hinsichtlich des Nutzens und der Handhabung neuer Technologien abgebaut und die Investitionsbereitschaft landwirtschaftlicher Betriebe erhöht werden. Gleichzeitig ermöglichen gut geschulte Anwenderinnen und Anwender eine zielgerichtete und effiziente Nutzung der Systeme, was zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beiträgt. Darüber hinaus leisten Bildungsangebote einen wichtigen Beitrag zur Etablierung technologieoffener Betriebskulturen und stärken den Wissensaustausch innerhalb der Branche.

Verschiedene im Projekt PFLOPF angewandte Verfahren werden seit dem Januar 2025 durch den Bund im Rahmen der Strukturverbesserung gefördert (BLW 2025a, BLW 2025b). Die Anschaffung neuer autonomer und halbautonomer Feldroboter, die den Einsatz von PSM reduzieren, wird mit 10 % der Anschaffungskosten durch den Bund gefördert. Der Kanton Zürich unterstützt die Anschaffungskosten mit dem gleichen Betrag zusätzlich (Strickhof, 2025). So können die Anschaffungskosten von Geräten mit Einzelpflanzenerkennung bzw. Sensorsystemen zur Ausbringung von PSM, von Hackgeräten zum Hacken in den Reihen und von autonomen Feldrobotern um bis zu 20 % verringert werden, was die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren verbessert und die Diffusion dieser Technologien fördert.

Zum Schluss muss jedoch gesagt werden, dass sich Kosten und Nutzen nicht nur finanziell bemessen lassen. In den persönlichen Gesprächen im Rahmen der Datenerfassung wurde von den Landwirten mehrfach darauf aufmerksam gemacht, dass nicht nur der finanzielle Aspekt wichtig bei der Entscheidung, ob man sich eine Technologie anschafft, ist. Oft spielt auch die Arbeitsentlastung eine grosse Rolle, allerdings ist diese nur schwer monetär zu bewerten.

6.17 Ausblick

Die Technologien lassen sich grob in vier Gruppen unterteilen, die sich jeweils durch ihre Praxistauglichkeit und folglich auch in ihrem Entwicklungspotential unterscheiden.

Technologien wie Lenksysteme und Teilbreitenschaltungen wurden im Projekt häufig eingesetzt. Das könnte daran liegen, dass diese Technologien gut in bestehende Abläufe integrierbar sind. Es sind zwar zu Beginn zusätzliche Arbeitsschritte notwendig, es müssen für das Lenksystem zum Beispiel die Fahrspuren festgelegt werden. Nach diesem Initialaufwand kann der Traktor mit dem Lenksystem oder die Spritze mit der automatischen Teilbreitenschaltung aber relativ ähnlich wie zuvor (also zum gleichen Zeitpunkt und mit der gleichen Häufigkeit) genutzt werden. Bei einem Lenksystem oder einer Teilbreitenschaltung ist es möglich, die gleiche Maschine wie vorher zu verwenden und die Technik nachzurüsten. Das zieht zum einen geringere Kosten als ein Neukauf der

ganzen Maschine nach sich, zum anderen ist die Bedienung der Maschine somit nicht gross anders und auch der Arbeitsablauf gestaltet sich immer noch gleich wie vorher. Diese Technologien werden sich weiterverbreiten und in Zukunft zu der Standardausrüstung eines jeden Traktors gehören.

Spot-Spraying wurde im Gemüsebau betrachtet hinsichtlich der punktuellen Unkrautbekämpfung und dem Pflanzenschutz vor Schädlingen und Pilzkrankheiten. Diese Verfahren erfordern grössere Investitionen. Die Anschaffung einer neuen Präzisionsspritze durch einen Gemüsebauer stellt eine recht grosse Investition dar. Die Wirtschaftlichkeit einer Präzisionsspritze hängt von dem Anschaffungspreis, der Auslastung und den Kosten der eingesparten PSM ab. Die Verbreitung hängt insbesondere von der weiteren Entwicklung der Anschaffungskosten und den PSM-Kosten ab. Für grosse Betriebe oder bei überbetrieblichem Einsatz kann eine Präzisionsspritze wirtschaftlich eingesetzt werden. Landwirte werden bei der Anschaffung von neuen Geräten finanziell unterstützt, was einen verstärkten Einsatz fördern kann. Die im Projekt eingesetzte und mit einer Präzisionsspritze ergänzte Hacke ist in der Anschaffung günstiger, weist aufgrund der geringen Arbeitsbreite und der geringen Arbeitsgeschwindigkeit allerdings hohe Kosten je ha auf, die durch die eingesparten PSM nicht ausgeglichen werden. Technische Entwicklungen könnten zu einer grösseren Flächenleistung beitragen und höhere PSM-Kosten und entsprechend grössere Einsparungen könnten dieses Verfahren wirtschaftlich attraktiver machen.

Die nächste Gruppe besteht aus neuen Geräten, bei denen man nun auch den Arbeitsablauf anpassen muss. Zu dieser Gruppe gehören das präzise Hacken, der Einsatz von Drohnen sowie die Punktspritzung im Bereich der Baumstämme zur Reduktion von Herbiziden. Gehackt wird mit einer tieferen Arbeitsgeschwindigkeit, was bedeutet, dass eine Überfahrt länger dauert. Es muss mehr auf das Wetter geachtet werden, denn nur, wenn der Boden trocken ist, kann gut gehackt werden. Diese zeitlich nötigen Anpassungen reduzieren die Praxistauglichkeit dieser Gruppe der Precision Farming Technologien. Hacken könnte sich auch bei einem anderen Zielpublikum, den Biobetrieben, verbreiten. Durch die präzisere Hacke können sie Handarbeit sparen und durch ihr Label finanziell besser entschädigt werden. Im Rahmen der Strukturverbesserung werden auch serienreife Hacken, welche innerhalb der Reihen hacken, gefördert.

Die letzte Gruppe besteht aus Technologien, die noch so grosse Schwierigkeiten in der Praxis aufweisen, dass sie nur selten eingesetzt werden. Hierzu gehören der Mulchroboter und die Spritze mit Laubwanddetektion im Obstbau. Hier bleibt abzuwarten, ob es technische Weiterentwicklungen geben wird, welche diese Technologien weiter verbessern und attraktiver für die Praxis machen.

6.18 Ergänzende Informationen

6.18.1 Fragebogen für die persönliche Datenerfassung

- Wie lange verwenden Sie das Lenksystem schon und wie sind Sie zuvor vorgegangen?
- Haben Sie einen Traktor mit integriertem Lenksystem oder haben Sie den Traktor nachgerüstet?
- Verwenden Sie das Lenksystem auf allen Feldern oder nur auf einem Teil? Wie gross ist die Fläche, die mit Lenksystemen befahren wird? Wie gross ist die gesamte LN?
- Haben Sie das Lenksystem selbst gekauft oder sät ein Lohnunternehmen die Samen?
- Wieso haben sie sich für den Kauf oder für die Beauftragung eines Lohnunternehmens entschieden und nicht für eine andere Option?
    - Falls gekauft: Wie teuer war das gesamte Lenksystem?
    - Falls gekauft: Wie teuer waren die zusätzlichen Kosten wie ein Abo für das GPS?
    - Falls gekauft: Wie nehmen sie die Reparaturkosten beim Lenksystem wahr?
    - Falls gekauft: Von welchem Hersteller ist das Lenksystem und um welches Fabrikat (Modell und Hersteller) handelt es sich?
    - Falls gekauft: War das Lenksystem neu oder wurde es gebraucht gekauft?
    - Falls gebraucht: Wie alt war das Lenksystem zum Kaufzeitpunkt?

- Wie gross war der Zusatzaufwand für die Installation der neuen Technologie? (z. B. Abfahren der Felder für die Aufzeichnung etc.)
- Gab es mit der Verwendung vom Lenksystem auch eine Änderung in der Arbeitsbelastung? Wurde sie grösser, kleiner oder blieb sie gleich?
- Falls ja: Haben sich neue Arbeitsspitzen gebildet oder kann die Arbeit besser verteilt werden?
- Falls ja: Gibt es auch qualitative Unterschiede?
- Was sind die wichtigsten Vor- und Nachteile des Lenksystems?
- Haben Sie durch die Verwendung eines Lenksystems Änderungen beim Ertrag festgestellt?
- Haben Sie Rückmeldungen von Kollegen bezüglich der Anwendung von Precision Farming Spritzen bekommen? Wie verbreitet ist das Lenksystem in ihrem Betriebszweig?
- Welche Precision Farming Technologien haben Sie sich nicht angeschafft und weshalb nicht?
- Bei welcher Massnahme können Sie sich vorstellen, sie in der Zukunft einzusetzen?

Die hier aufgeführte Liste zeigt beispielhaft die Fragen, die den Landwirten in einem persönlichen Gespräch gestellt wurden. Hier sind nur die Fragen für ein Lenksystem dargestellt, für die anderen Massnahmen (mit Ausnahme der Prognosesysteme und der roboterbasierten Unkrautbekämpfung) wurden die Fragen analog gestellt. Die beiden Fragen am Schluss wurden im Verlaufe des Gespräches jeweils nur einmal gestellt, auch wenn sie im Fragebogen von jeder Massnahme enthalten waren. So wurde sichergestellt, dass sie sicher mindestens einmal abgefragt wurden.

6.18.2 Fragebogen für die Onlinebefragung

Einstieg

In welcher Funktion haben Sie am Projekt PFLOPF mitgewirkt?

- Als landwirtschaftlicher Betrieb
- Auch als Lohnunternehmer

Welche Rolle nehmen Sie auf dem Betrieb ein?

- Betriebsleiter
- Angestellter
- Auszubildender
- Weiteres:

Wie alt sind Sie?

- Unter 35 Jahre
- 35 - 45 Jahre
- 46 - 55 Jahre
- 56 - 65 Jahre
- über 65 Jahre

Wie gross ist die landwirtschaftliche Nutzfläche auf ihrem Betrieb in Hektar?

Wie viele Mitarbeitende gehören zur Familie und wie viele wurden zusätzlich angestellt? (Maximale Belegung während der Saison)

- … Familienarbeitskraft

- … Familienfremde Arbeitskraft

Wie viele Mitarbeitende arbeiten auf dem Betrieb?

- Bitte schätzen Sie die Anzahl Vollzeitäquivalente auf eine Nachkommastelle.

Mit welchen Betriebszweigen nehmen Sie am Projekt PFLOPF teil?

- Ackerbau
- Gemüsebau
- Obstbau
- Rebbau

In welchen Ackerkulturen haben Sie die Massnahmen des Projektes PFLOPF umgesetzt?

- Weizen
- Gerste
- Mais
- andere Getreide
- Kartoffeln
- Zuckerrüben
- Raps
- Sonnenblumen
- Soja
- andere Ölsaaten
- Eiweisspflanzen
- Weitere:

In welchen Gemüsekulturen haben Sie die Massnahmen des Projektes PFLOPF umgesetzt?

- Karotten
- Tomaten
- Salat
- Kohlarten
- Zwiebeln
- Weitere:

In welchen Obstkulturen haben Sie die Massnahmen des Projektes PFLOPF umgesetzt?

- Äpfel
- Birnen
- Kirschen
- Zwetschgen und Pflaumen
- Beeren
- Weitere:

Affinity for technology interaction (ATI) scale, Deutsche Version

- Ich beschäftige mich gern genauer mit technischen Systemen.
- Ich probiere gern die Funktionen neuer technischer Systeme aus.
- In erster Linie beschäftige ich mich mit technischen Systemen, weil ich muss.
- Wenn ich ein neues technisches System vor mir habe, probiere ich es intensiv aus.

- Ich verbringe sehr gern Zeit mit dem Kennenlernen eines neuen technischen Systems.
- Es genügt mir, dass ein technisches System funktioniert, mir ist es egal, wie oder warum.
- Ich versuche zu verstehen, wie ein technisches Systemgenau funktioniert.
- Es genügt mir, die Grundfunktionen eines technischen Systems zu kennen.
- Ich versuche, die Möglichkeiten eines technischen Systems voll auszunutzen.

Fragen zu Prognosesystemen (beispielhaft nur für CERCBET dargestellt)

Ich habe folgende Prognosesysteme verwendet:

- Cercbet
- Septri
- Fusaprog
- PhytoPRE

Bewerten Sie bitte folgende Aussagen zum Prognosemodell Cercbet von «stimme überhaupt nicht zu» bis «stimme voll zu».

- Cercbet ist zuverlässig.
- Cercbet ist einfach zu benutzen.
- Durch die Verwendung von Cercbet konnte die Anzahl an Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln reduziert werden.
- Dank Cercbet bringe ich die Pflanzenschutzmittel zum richtigen Zeitpunkt aus.
- Cercbet ist hilfreich.

Ich habe Cercbet zum ersten Mal im Jahr ... und zum letzten Mal im Jahr ... verwendet.

So häufig habe ich Cercbet während der Hauptinfektionszeit verwendet.

- Einmal pro Saison
- Einmal im Monat
- Alle zwei Wochen
- Einmal pro Woche
- Täglich

Wie beurteilen Sie das Verhältnis von Zeitaufwand und Nutzen bei der Verwendung von Cercbet?

- Sehr negativ
- Eher negativ
- Neutral
- Eher positiv
- Sehr positiv

Der Fragebogen stellt danach analoge Fragen zu den anderen Massnahmen.

6.18.3 Annahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse

6.18.3.1 M2 Lenksysteme

Maschinencodes	**Automatisches Lenksystem mit RTK, 1026**			
Anschaffungspreis	15 500 Fr. (Bütler et al., 2024)			
Auslastung	400 Stunden (Bütler et al., 2024)			
PSM Einsparpotential	1,5 % (Latsch, 2024, mündliche Quelle)			
Einsparpotential Arbeitszeit und Traktorstunden	5 %			
Lohnansatz	31 Fr. (Bütler et al., 2024)			
Zugkraftstunden (Vonnez et al., 2024)	Weizen 13 h pro ha Raps 12 h pro ha Zuckerrüben 12 h pro ha Kartoffeln 53 h pro ha Gerste 13 h pro ha Körnermais 10 h pro ha Silomais 12 h pro ha Übrige OAF 14,8 h pro ha			
Bei der Berechnung beachtete Fläche: Flächen eines durchschnittlichen Ackerbaubetriebs (Mittelwert der Jahre 2021–2023, Hoop et al., 2024)	Offene Ackerfläche (OAF) 32,47 ha Brotgetreide 10,98 ha Ölsaaten 5,48 ha Zuckerrüben 3,82 ha Kartoffeln 1,81 ha Futtergetreide 3,75 ha Körnermais 2,37 ha Silo- und Grünmais 2,05 ha Übrige OAF 2,20			
Direktkosten (Vonnez et al., 2024)	Kultur Weizen Raps Zuckerrüben Kartoffeln Gerste Mais Übrige OAF (gew. Mittel der Kulturen)	Saatgut 254 138 455 2603 217 257 395	Düngung 354 509 514 911 295 446 442	PSM 197 355 448 1006 251 272 323

Maschinenkosten

Für die Maschinenkosten wurde die angenommene Auslastung von 400 Stunden aus dem Kostenkatalog zuerst überprüft. Dafür wurden die nötigen Zugkraftstunden pro Hektar aller Kulturen eines durchschnittlichen Ackerbaubetriebs mit den Flächen der jeweiligen Kulturen multipliziert. So wurde eine Auslastung von ungefähr 480 Stunden ermittelt. Um von einer eher konservativeren Auslastung des Lenksystems auszugehen, wurde der Wert aus dem Kostenkatalog übernommen.

Die Auslastung wurde bei TractoScope eingegeben, um den Entschädigungsansatz von 5.26 Fr. pro Stunde zu erhalten. Dieser Entschädigungsansatz wird dann mit der Auslastung von 400 Stunden multipliziert, wodurch jährliche Kosten von 2104 Fr. entstehen.

Direktkosten

Die Direktkosten pro Hektar wurden mit den Flächen des durchschnittlichen Ackerbaubetriebs multipliziert, um die Kosten für die Bewirtschaftung von einem Jahr zu erhalten.

Kultur	Jahreskosten
Weizen	8839 Fr.
Raps	5491 Fr.
Zuckerrüben	5413 Fr.
Kartoffeln	8181 Fr.
Gerste	2861 Fr.
Körnermais	2311 Fr.
Silomais	1999 Fr.
Übrige OAF	2552 Fr.

Werden diese Kosten addiert, entstehen Kosten für den Pflanzenschutz auf einem ganzen Betrieb von 37 646 Fr. im Jahr. Können 1,5 % dieser Kosten gespart werden, sinken die Kosten um 566 Fr.

Arbeitszeit

Das Einsparpotential der Arbeitszeit wird berechnet, indem von der Auslastung von 480 Stunden, die oben mithilfe der Zugkraftstunden berechnet wurde, 5 % berechnet werden, um die Arbeitszeiteinsparung darzustellen. Diese Reduktion an Stunden wird dann mit dem Lohnansatz (31 Fr./h) multipliziert. Für eine Traktorstunde werden 39.78 Fr. je h (Code 1005 im Kostenkatalog ohne Risikozuschlag) angesetzt.

6.18.3.2 M3 Automatische Teilbreitenschaltung

Maschinencodes	**Anbaufeldspritze, 21 m Balken, 1000 Liter Fass, 5156 Lenksystem, 1026**	
Mehrkosten Teilbreitenschaltung	5000 Fr. = 3500 Fr. Anschaffung + 1500 Fr. einmalige Gebühr Freischaltung	
Auslastung	126 ha kalkuliert für Betriebstyp Ackerbau	
PSM Einsparpotential	4 % (Latsch, 2024, mündliche Quelle)	
Lohnansatz	31 Fr. (Bütler et al., 2024)	
Flächen eines durchschnittlichen Ackerbaubetriebs (Mittelwert der Jahre 2021–2023, Hoop et al., 2024)	Offene Ackerfläche (OAF) 32,47 ha Brotgetreide 10,98 ha Ölsaaten 5,48 ha Zuckerrüben 3,82 ha Kartoffeln 1,81 ha Futtergetreide 3,75 ha Körnermais 2,37 ha Silo- und Grünmais 2,05 ha Übrige OAF 2,20 ha	
Direktkosten für Pflanzenschutzmittel (Vonnez et al., 2024)	**Kultur** Weizen Raps Zuckerrüben Kartoffeln Gerste Körnermais Silomais übrige OAF	**PSM in Fr.** 2163 1946 1711 1821 941 645 558 711
Angenommene Spritzungen, die während eines Jahres durchgeführt werden (Vonnez et al., 2024)	**Kultur** Weizen Raps Zuckerrüben Kartoffeln	**Anzahl Überfahrten** 3 4 8 9

Maschinencodes	Anbaufeldspritze, 21 m Balken, 1000 Liter Fass, 5156 Lenksystem, 1026	
	Gerste Mais Silomais	3 1 1

Maschinenkosten

Zuerst wurde überprüft, ab die im Kostenkatalog angenommene jährliche Auslastung für den Betriebstyp «Ackerbau» wie in der Einkommensstatistik angegeben übernommen werden kann. Dafür wurden die pro Kultur angenommenen Spritzungen mit der jeweiligen Fläche multipliziert. Danach wurden diese Einsatzflächen pro Kultur addiert, um die Einsatzfläche für den ganzen Betrieb zu erhalten. Dies ergibt eine Einsatzfläche von 126 ha, die jährlich behandelt wurde.

Die Maschinenkosten werden berechnet, indem mithilfe von Tractoscope der Entschädigungsansatz pro Hektar berechnet und dieser Entschädigungsansatz dann mit der jährlichen Auslastung von 126 Hektaren multipliziert wird. Das wurde mit den Annahmen aus dem Kostenkatalog und mit beiden Annahmen für den Anschaffungspreis gemacht.

Direktkosten

Bei dieser Massnahme werden nur die Kosten für PSM beachtet, da kein Saatgut und Düngemittel eingespart werden können. Auch hier werden die PSM-Kosten pro Hektar mit den Flächen eines durchschnittlichen Ackerbaubetriebs multipliziert, so dass die jährlichen Kosten erhalten werden. Für die übrige OAF wurden Direktkosten und PSM-Ausbringungen gemäss dem gewichteten Mittelwert der genannten Kulturen berücksichtigt: PSM-Ausgaben von 323 Fr./ha und 3,9 PSM-Anwendungen je ha und Jahr. Betriebsweit ergeben sich in einem Jahr PSM-Kosten in Höhe von 10 495 Fr. Danach werden 4 % davon berechnet, um die Einsparung an Direktkosten zu erhalten, dies ergibt 420 Fr. jährlich Einsparungen.

6.18.3.3 M4 Spot-Spraying

Maschinencodes	Traktor 65–74 kW (88–101 PS), 1005 Präzisions-Feldspritze, kameragesteuert, 6m, 700 l Fronttank, 5161 Anbaufeldspritze, 15 m Balken, 800 l Fass, 5154
Anschaffungspreis	Präzisionsfeldspritze: 130 000 Fr. (Anschaffungspreis der Kostenkatalogs von 142 000 Fr. wurde gemäss Expertenangabe niedriger angesetzt) Anbaufeldspritze: 28 000 Fr. (Bütler et al., 2024)
Auslastung	Präzisionsfeldspritze: 300 ha (zwei Szenarien berechnet) Anbaufeldspritze: 100 Hektaren (Bütler et al., 2024)
PSM Einsparpotential	80 % (Latsch, 2024, mündliche Quelle)
Lohnansatz	31 Fr. (Bütler et al., 2024)
Direktkosten	**Zwiebeln**: 647 Fr. (Kalkulation gemäss im Jahr 2024 angewendeter Herbizidmengen, Preise aus Agridea «Reflex 2024»): Lentagran (4-mal: 0,7–1 kg/ha), Bandur (4-mal: 0,3–0,5 l/ha), Starane (4-mal: 0,1 l/ha), Alopex (2-mal: 0,083 kg/ha), Natrel (1-mal: 8 l/ha), im Mittel 162 Fr./Herbizidspritzung **Salat**: 555 Fr. (Proficost, 2024)
Bei der Berechnung beachtete Fläche	1 ha Zwiebeln (Einlagerung) 1 ha Eisbergsalat

Maschinenkosten

Da bei dieser Massnahme nur ein Hektar Eisbergsalat und nicht mehr ein ganzer Betrieb betrachtet wurde, musste anders als zuvor vorgegangen werden. Für die Kosten der Spritzen wurde mithilfe von Tractoscope der Entschädigungsansatz berechnet. Zusätzlich zu den Kosten wurde auch noch der Entschädigungsansatz des Traktors mit der Auslastung berechnet. Da sich mit den unterschiedlichen Maschinen auch die Flächenleistung ändert, ändern sich auch die Arbeitskosten.

Direktkosten

Die Direktkosten wurden analog zu den Direktkosten bei der Teilbreitenschaltung berechnet.

6.18.3.4 M5 Hacken

Maschinencodes	**Anbaufeldspritze, 21 m Balken, 1000 l Fass, 5156** **Scharhackgerät, 6-reihig, klappbar, 5121** **Scharhackgerät, 6-reihig, Kamerasteuerung mit Verschieberahmen, 5125** **Kameragesteuerte Hacke in der Reihe, Front- oder Heckanbau, 15036** **(Anschaffungspreis 75 00 Fr. angepasst** **Bandspritze: in Anlehnung an 15034, Anschaffungspreis 7000 Fr.** **Traktor 65–74 kW (88–101 PS), 1005** **(Bütler et al., 2024; Fischer, 2021)**
Anschaffungspreis	Anbaufeldspritze: 26 000 Fr. Kameragesteuerte Hacke in der Reihe: 75 000 Fr. Scharhackgerät: 14 500 Fr. Scharhackgerät mit Kamera: 44 000 Fr. (Bütler et al., 2024)
Auslastung	Anbaufeldspritze: 50 Hektaren Hackroboter: 60 Hektaren Traktor: 450 Stunden Scharhackgerät: 60 Hektaren Scharhackgerät mit Kamera: 80 Hektaren Bandspritze: 15 ha (Annahme auf Basis Flächenstruktur) (Bütler et al., 2024)
PSM-Einsparpotential	Zuckerrüben: 62,5 % Mais: 50 %
Lohnansatz	31 Fr. (Bütler et al., 2024)
Direktkosten	Zuckerrüben: 140 Fr. Mais: 120 Fr. (Vonnez et al., 2024)
Bei der Berechnung beachtete Fläche	1 Hektar Zuckerrüben 1 Hektar Mais

Maschinenkosten

Die Maschinenkosten der Spritze und der Hacke wurden mit Tractoscope berechnet. Zusätzlich fallen zur Spritze oder der Hacke noch die Kosten für den Traktor an, der die Maschine zieht. Da pro Hektar Zuckerrüben drei Mal und pro Hektar Mais einmal gespritzt wird, werden die Kosten der Spritze mit diesen Werten multipliziert. Beim Hacken wird analog vorgegangen, hier werden die Kosten mit zwei oder sechs multipliziert.

Da nur zwei Kulturen berechnet werden, lassen sich die Kosten für PSM direkt aus dem Deckungsbeitragskatalog (Vonnez et al., 2024) entnehmen und das PSM-Einsparpotential davon berechnen.

6.18.3.5 M7 Drohne

Maschinencodes	**Sprühdrohne, inklusive Akku, 14068** **Schmalspurtraktor, 4-Radantrieb, 45 kW (61 PS), 1044** **Gebläsespritze, 200–300 l Fass, Dreipunktanbau, 14061**
Anschaffungspreis	Sprühdrohne: 40 000 Fr. (Bütler et al., 2024) Schmalspurtraktor: 62 000 Fr. (Bütler et al., 2024) Gebläsespritze: 13'000 Fr. (Bütler et al., 2024) Sprühdrohne DJI Agrar T30 mit Zulassung Weinbau 12 000 €, mit Zubehör (Akkus) 20 000 Fr. angenommen (https://smartmulticopters.at/)
Auslastung (Standardwerte Maschinenkatalog)	Sprühdrohne: 50 ha (140 Hektar) Schmalspurtraktor: 250 Stunden Gebläsespritze: 50 Hektare (50 ha)
Lohnansatz	31 Fr. (Bütler et al., 2024)
Direktkosten	1466 Fr.
Bei der Berechnung beachtete Fläche	1 Hektar Reben

Maschinenkosten

Der Entschädigungsansatz wird mithilfe von Tractoscope berechnet. Da die Direktkosten aber nur pro Jahr angegeben sind, muss der Entschädigungsansatz pro Hektar mit der Anzahl Überfahrten für die Bewirtschaftung von Reben während einem Jahr multipliziert werden.

Die Gebläsespritze weist laut Kostenkatalog eine Arbeitsleistung von 66 Aren pro Stunde auf. Im Deckungsbeitragkatalog wird die Arbeit, die nötig ist, um einen Hektar Blauburgunder in Zürich nach ÖLN-Richtlinien zu bewirtschaften, mit zwölf Stunden bezeichnet. So lässt sich mit einem Dreisatz berechnen, dass wenn in einer Stunde 0,66 Hektar befahren werden, in zwölf Stunden 7,92 Hektar befahren werden. Dies wird zu acht Hektar aufgerundet, was bedeutet, dass ein Hektar Reben während einem Jahr acht Mal für den Pflanzenschutz überfahren wird.

Direktkosten

Die Direktkosten können direkt aus dem Deckungsbeitragkatalog übernommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass gleich viel PSM verwendet wird, egal, ob mit der Drohne oder mit der Gebläsespritze gespritzt wird.

7 Literaturverzeichnis

Agroline (2025). Pflanzenschutz Weinbau – VitiDrone. Abgerufen am 22.04.2025 von https://www.agroline.ch/de/service/dienstleistungen/drohnendienstleisungen/product/drohnenservice/vitidrone-de.

Bockholt K. (2024). Pflanzenschutz: Landwirt rechnet vor, wie viel Spot-Spraying einspart. Agrarheute. https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/pflanzenschutz-landwirt-rechnet-viel-spot-spraying-einspart-623829.

BLV (2024). Weisungen der Zulassungsstelle betreffend die Massnahmen zur Reduktion der Risiken bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Zulassungsstelle Pflanzenschutzmittel. Bern, 4. Juni 2024. https://www.blv.admin.ch/dam/blv/de/dokumente/zulassung-pflanzenschutzmittel/anwendung-und-vollzug/weisungen-merkblaetter/weisung-massnahmen-risikoreduktion.pdf.download.pdf/Weisungen%20der%20Zulassungsstelle%20betreffend%20die%20Massnahmen%20zur%20Reduktion%20der%20Risiken%20bei%20der%20Anwendung%20von%20Pflanzenschutzmitteln.pdf

BLW (2025a). Strukturverbesserungsverordnung. Anhang 6, Ziff. 3.2.1. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). Abgerufen am 24.02.2025 von https://fedlex.data.admin.ch/eli/oc/2024/672.

BLW (2025b). Weisungen zur Verordnung über die Strukturverbesserungen in der Landwirtschaft. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). Abgerufen am 07.05.2025 von https://backend.blw.admin.ch/fileservice/sdweb-docs-prod-blwch-files/files/2025/03/06/f011b922-5ebf-4f43-82dc-9aea2826daaa.pdf.

Boos J., Frei, S., Strebel S., Bernhard L., Koller C. (2023). Pilotprojekt für energieautarke Anwendungen. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil.

Carnesecchi E., Mostrag A., Ciacci A, Roncaglioni A., Tarkhov A., Gibin D., Sartori L., Benfenati E., Yang C., Dorne J. L. C. M. (2023). OpenFoodTox: EFSA's chemical hazards database (Version 6, September 13, 2023). https://doi.org/10.5281/zenodo.8120114

Dabbert S. und Braun J. (2012). Landwirtschaftliche Betriebslehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer KG, Stuttgart.

Dachbrodt-Saaydeh S. und Golla B. (2013). Survey on Pest Monitoring Systems across Europe within the Realm of Integrated Pest Management.

Dierauer H. (2019). Wann lohnt sich das Hacken in Getreide? UFA-Revue. https://www.ufarevue.ch/landtechnik/wann-lohnt-sich-das-hacken-in-getreide

DLG Ausschuss für Öko-Landbau, DLG-Ausschuss für Technik in der Pflanzenproduktion, Köller K. H., Vinzent B., Demmel M. (2019) Mechanische Unkrautregulierung – Technik für die Praxis. DLG-Merkblatt 499. https://www.dlg.org/mediacenter/dlg-merkblaetter/dlg-merkblatt-449-mechanische-unkrautregulierung-technik-fuer-die-praxis-1

Dubuis P. H., Droz M., Melgar A., Zürcher U. A., Zarn J. A., Gindro K., König S. L., (2023). Environmental, bystander and resident exposure from orchard applications using an agricultural unmanned aerial spraying system. Science of the total environment 881 (163371). https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723019903

Feiffer Consult (2024). Mit Smart Farming zu stabilen Getreidebeständen, die sich leicht dreschen lassen. Die Grüne. https://www.diegruene.ch/artikel/landtechnik/mit-smart-farming-zu-stabilen-getreidebestaende-die-sich-leicht-dreschen-lassen-513051.

Fischer R. (2021). Herbizidreduktion mit Bandspritzen und Hacken. Aufgerufen am 23.04.2025 von Herbizidreduktion mit Bandspritzen und Hacken – agrobeta.ch.

Fishkis O., Strassemeier J., Ross C. A., Koch H. (2024). Klimawirkung, toxikologische Risiken und Wirtschaftlichkeit von konventionellen und neuen Unkrautbekämpfungsverfahren in Zuckerrüben. Sugar Industry 149, 460-468. https://doi.org/10.36961/si31552.

Franke T., Attig C., Wessel D. (2019). A Personal Resource for Technology Interaction: Development and Validation of the Affinity for Technology Interaction (ATI) Scale. International Journal of Human–Computer Interaction, 35(6), 456-467. https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1456150.

Gabriel A. und Gandorfer M. (2023). Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a european small-scale farming region. Precision Agriculture, 24(1), 68–91. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09931-1.

Gazzarin C. und Lips M. (2018). Methodische Grundlagen für die Berechnung der Maschinenkosten. Agroscope Science 79.

Giagnocavo C., Duque-Acevedo M., Terán-Yépez E., Herforth-Rahme J., Defossez E., Carlesi S., Delalieux S., Gkisakis V., Márton A., Molina-Delgado D., Moreno J. C., Ramirez-Santos A. G., Reinmuth E., Sánchez G., Soto I., Van Nieuwenhove T., Volpi I. (2025). A multi-stakeholder perspective on the use of digital technologies in European organic and agroecological farming systems. Technology in Society, 81, 102763. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102763.

Groher T., Heitkämper K., Walter A., Liebisch F., Umstätter C. (2020). Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. Precision Agriculture, 21, 1327–1350. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09723-5.

Handler F., Blumauer E., Paar J. (2010). GPS-Anwendung die sich rechnet. Der fortschrittliche Landwirt. Sonderheft GPS-Anwendung, 46–49.

Hanke C. (2025). Mündliche Auskunft zu den Kosten der Bewilligung und Ausbildung zum Flug von Sprühdrohnen in der Schweizer Landwirtschaft.

Health and Safety Executive (HSE) (2015). Drainage PECs Version 1.0. https://www.hse.gov.uk/pesticides/data-requirements-handbook/fate/pecsw-sed-via-drainflow.htm, https://www.hse.gov.uk/pesticides/assets/docs/pec-sw-sed-drainage.xlsx.

Heitkämper K., Reissig L., Bravin E., Glück S., Mann S. (2023). Digital technology adoption for plant protection: Assembling the environmental, labour, economic and social pieces of the puzzle. Smart Agricultural Technology 4, https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100148.

Holpp M. (2006). Parallelfahrsysteme für Traktoren. Technik und Wirtschaftlichkeit. Art Berichte, 659.

Holpp M., Kroulik M., Kviz Z., Anken T., Sauter M., Hensel O. (2013). Large-scale field evaluation of driving performance and ergonomic effects of satellite-based guidance systems. Biosystems Engineering 116, 190–197

Holpp M. (2018) Optimierung und Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes mit Precision Farming Technologien. Projektgesuch. Agrofutura.

Hoop D., Jan P., Renner S., Schiltknecht P., Schmid D. (2024). Landwirtschaftliche Einkommensstatistik 2023. Stichprobe Einkommenssituation. Ökonomie Spezialpublikationen, https://doi.org/10.34776/eink23-d.

Kehl C., Meyer R., Steiger S. (2021). Digitalisierung der Landwirtschaft: technologischer Stand und Perspektiven. Teil I des Endberichts zum TA-Projekt, Arbeitsbericht Nr. 193. https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000142950/146339105.

Keiser, A., Jungo, B., Bertschi, C., Jenni, S. (2016). Herbizidreduktion durch eine kombinierte mechanisch-chemische Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben. Berner Fachhochschule (BFH-HAFL), Bern.

Keller M., Haberey P., Hodel D., Total R., Heitkämper K., Bravin E., Glück S., Collet L., Wyss S., Steiner S., Möri H., Wyssa T., Anken T., Duckert F., Matter R. (2023). Ressourcenschonender, nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter (2017−2021). Agroscope Science 151. 1–41.

Kemper M. (2016). Typische Fehlanwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Hobbygarten. Abgerufen am 11.02.2025 von https://www.umweltbundesamt.de/typische-fehlanwendungen-von-pflanzenschutzmitteln#Fehlanwendungen-Witterung.

Knewitz H. (2015). Wie viel Flüssigkeit wird durchgeblasen? Das deutsche Weinmagazin 11, 18–21.

Kögler K., Zorn A. (2025). PFLOPF – Kosten und Nutzen des Einsatzes von Precision Farming Technologien. Interner Bericht zuhanden der Projektträgerschaft des Ressourcenprojektes PFLOPF. Agroscope, Ettenhausen.

Lippl M., Lampert P., Andreas G., Schöps J. Botzler F. (2024). Pflanzenschutz im Wandel – Chancen und Risiken neuartiger PSM und Anwendungstechniken für den Schutz der Umwelt erfassen und sinnvolle Steuerung der Entwicklungen vorbereiten. Texte 138. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt (UBA).

Luck J. D., Zandonadi R. S., Luck B. D., Shearer S. A. (2010) Reducing Pesticide Over-Application with Map-Based Automatic Boom Section Control on Agricultural Sprayers. Transactions of the ASABE, 53(3), 685–690. https://doi.org/doi: 10.13031/2013.30060.

Lutz E., Ranke J. (2025). PFLOPF - PSM-Kennzahlen und Risikopotentiale. Interner Bericht zuhanden der Projektträgerschaft des Ressourcenprojektes PFLOPF. Agroscope, Ettenhausen.

McFadden J., Casalini F., Griffin T., Antón J. (2022). The digitalisation of agriculture. OECD Food, Agriculture and Fisheries paper n°176. Paris, OECD Publishing. https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/285cc27d-en.

Michonneau F., Brown J.W., Winter D.J. (2016). rotl: an R package to interact with the Open Tree of Life data. Methods in Ecology and Evolution, 7(12), 1476-1481. doi:10.1111/2041-210X.12593.

Mizik T. (2023). How can precision farming work on a small scale? A systematic literature review. Precision Agriculture, 24(1), 384-406. https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y.

Ranke J. (2024). pfm: Utilities for Pesticide Fate Modelling. R package version 0.6.3, https://github.com/jranke/pfm, https://pkgdown.jrwb.de/pfm.

Ranke J. (2023). OpenFoodTox - R package making OpenFoodTox data accessible in R. R package version 0.1.3, https://github.com/agroscope-ch/openfoodtox, https://agroscope-ch.github.io/openfoodtox.

Rath-Kampe J. (2016). Trends bei automatischen Lenksystemen. Agrarheute, 2016. Aufgerufen am 19.02.2025 von https://www.agrarheute.com/bilder/trends-automatischen-lenksystemen-527519.

Rautmann D., Streloke M., Winkler R. (2001): New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/284496304_New_basic_drift_values_in_the_authorization_procedure_for_plant_protection_products.

Reckleben Y. (2015). Wann sich Parallelfahrsysteme lohnen. automation-next.de, Aufgerufen am 15.05.2025 von www.automation-next.com/future-tech/wann-sich-parallelfahrsysteme-lohnen-117.html.

Reckleben Y., Noack, P. O. (2012). RTK-Netzwerke zur flächendeckenden hochgenauen Positionsbestimmung in der Landwirtschaft. Landtechnik 67 (3), 162–165.

Reisch E. (1976). Betriebswirtschaftliche Methoden zur Beurteilung von technischen Neuerungen. Grundlagen der Landtechnik 26(1): 1–5.

Senn D. (2021). 80 bis 95 Prozent weniger Herbizideinsatz. Der Schweizer Bauer. Aufgerufen am 26.02.2025 von https://www.schweizerbauer.ch/landtechnik/neuheiten/80-bis-95-prozent-weniger-herbizideinsatz#%22.

Singhal A. (2012). Introducing the knowledge graph: things, not strings. Google. Aufgerufen am 04.02.2025 von https://blog.google/products/search/introducing-knowledge-graph-things-not/.

Strickhof (2025). Förderung von Feldrobotern und E-Traktoren. Aufgerufen am 07.05.2025 von https://redaktion.strickhof.ch/server/api/dokument/GetDokument?id=14163.

Umweltbundesamt (UBA) (2017). Simulationsmodell “EXPOSIT 3.02”. https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/zul_umwelt_exposit.html

Velandia M., Buschermohle M., Larson J. A., Thompson N. M., Jernigan B. M. (2013). The economics of automatic section control technology for planters: A case study of middle and west Tennessee farms. Computers and Electronics in Agriculture, 95. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.03.006.

Vogt C. (2019). Die 10 goldenen Regeln beim Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Sanu future learning ag. Aufgerufen am 11.02.2025 von https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/chemikalien/fachinfo-daten/merkblatt_die_10goldenenregelnbeimeinsatzvonpflanzenschutzmittel.pdf.download.pdf/merkblatt_die_10goldenenregelnbeimeinsatzvonpflanzenschutzmittel.pdf.

von Ahlefeld P. J. W. (2021). Ein Technologieakzeptanzmodell zur Erklärung der Nutzungsentscheidung für eine Pflanzenschutz-App. Berichte über Landwirtschaft, 99(2). https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/336/564.

Vonnez J., Schneider L., Gloor A., Reverchon M., Willi C., Guyer A., Ramseyer N., Salzmann J., Wof S., Schütz A., Helfenstein R., Grüter L., Niklaus D., Kyburz M. (2024). Deckungsbeiträge 2024. Getreide, Hackfrüchte, übrige Ackerkulturen, Futterbau, Spezialkulturen, Tierhaltung. Agridea/FiBL.

Weigand S. (2021). Schlanker Pflanzenschutz mit Algorithmen. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. Aufgerufen am 26.02.2025 von https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/verschiedenes/dateien/lfl-magazin-2021_smart-farming_pflanzenschutz-algorithmen.pdf.

Witsoe J., Total R., Haberey P., Heitkämper K., Bravin E., Möri H., Steffen P., Wyssa T., Anken T., Matter R., Keller M. (2024) Nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch Spotspraying-Technik (2021–2023). Abschlussbericht. Agroscope Posieux.

Zeddies H. H., Busch G., Qaim M. (2024). Positive public attitudes towards agricultural robots. Scientific Reports, 14(1), 15607. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66198-4.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozentuale Überlappung der Pflegearbeitsbreiten ohne und mit Lenksystem-Einsatz. Daten von 35 Parzellen, verteilt auf 21 Betriebe mit diversen Kulturen und Pflegearbeitsbreiten. 44

Abbildung 2: Im Jahresverlauf erzielte Einsparungen an Fungiziden und Insektiziden durch die automatische Anpassung der Applikationsmenge an das Laubwandvolumen. Daten der Saison 2024 von zwei Parzellen einer Mostobstanlage ohne Hagelschutz. Als Referenz diente die 2023 ermittelte Ausbringmenge bei manueller Schaltung der Spritzdüsen am Anfang und Ende der Reihen. Neben den Einzelwerten (Punkte) sind die Mittelwerte (Kreuze) der Behandlungen im April, Mai und Juni/Juli dargestellt. 48

Abbildung 3: Punktspritzung von Herbizid im Stammbereich von Obstbäumen. Links: Junger Baum direkt am Pflanzstab. Mitte: Älterer Baum mit Abstand zum Pflanzstab. In Höhe der gestrichelten Linie löst die Lichtschranke zweimal aus. Die Spritzdüse bleibt dadurch insgesamt länger geöffnet. Rechts: Bei einem Hagelnetzpfahl zwischen zwei Bäumen wird der Bereich durchgehend gespritzt. 49

Abbildung 4: Erzielte PSM-Einsparungen durch Hacken und Bandspritzung in Zuckerrüben und Mais. Daten von 52 (Zuckerrüben) bzw. 49 Parzellen (Mais) der Jahre 2020–2024. 51

Abbildung 5: Erzielte PSM-Einsparungen durch Hacken in Gemüsekulturen. Daten von PFLOPF-Betrieben aus den Jahren 2020–2024. 52

Abbildung 6: Belagsmessungen an Reben mit wassersensitivem Papier nach zwei Drohnenbehandlungen quer zu den Reihen. Der Anteil der benetzten Fläche wurde an je 9 Rebstöcken direkt unterhalb und zwischen den Flugbahnen der Drohne bestimmt. Messungen jeweils an der Triebspitze (2 Blätter) und in der Traubenzone (Blüte: 2 Blätter+2 Gescheine; volle LW: 2 Trauben), bei voll entwickelter Laubwand (LW) zusätzlich in der mittleren Zone der Reben (2 Blätter). 55

Abbildung 7: Anzahl Fungizid-Interventionen (2020–2022) je Rebenparzelle im PFLOPF Projekt. Links für die effektiven Fungizid-Applikationen (Spritzplan). Rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). X = Mittelwert. 59

Abbildung 8: Applizierte Fungizid-Wirkstoffmenge in kg/ha (2020–2022) je Rebenparzelle im PFLOPF Projekt. Links für die effektiven Fungizid-Applikationen (Spritzplan). Rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). X = Mittelwert 60

Abbildung 9: Potenzielle Risiken der Rebbau-Spritzpläne für Organismen in Oberflächengewässern. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid-Einträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage für die Jahre 2020 bis 2022. Links für die effektiven Fungizid-Applikationen (Spritzplan). Rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). X = Mittelwert. 61

Abbildung 10: Durchschnittliche potenzielle Risiken für Organismen in Oberflächengewässern der Rebbau-Spritzpläne in den Projektjahren 2020 bis 2022. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid-Einträge und dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Wirkstoff. Jeweils links für die effektiven Spritzpläne und rechts für die mit dem Modell «Angepasste Dosierung nach Laubwandvolumen» berechneten optimierten Fungizid-Applikationen (Modell). 62

Abbildung 11: Anzahl Fungizid- (links) und Insektizid-Interventionen (rechts) auf Salatkulturen mit der Massnahme Spot-Spraying (Spot, jeweils rechts) in den Jahren 2022 bis 2024. Zum Vergleich ist jeweils links die voraussichtlich notwendige Anzahl an Interventionen bei reiner Flächenbehandlung (Fläche) dargestellt. X = Mittelwert. 63

Abbildung 12: Applizierte Fungizid- (links) und Insektizid-Wirkstoffmenge [kg/ha] (rechts) auf Salatkulturen mit der Massnahme Spot-Spraying (Spot, jeweils rechts) in den Jahren 2022 bis 2024. Zum Vergleich ist jeweils links die voraussichtlich notwendige Wirkstoffmenge bei reiner Flächenbehandlung (Fläche) dargestellt. X = Mittelwert. 64

Abbildung 13: Potenzielle Risiken der Salat-Spritzpläne für Organismen in Oberflächengewässern. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Fungizid- bzw. Insektizid-Einträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage für die Jahre 2022 bis 2024. Jeweils rechts für Salatkulturen mit teilweise Spot-Behandlungen (Spot) und zum Vergleich jeweils links für reine Flächenbehandlungen (Fläche). X = Mittelwert. 64

Abbildung 14: Durchschnittliche potenzielle Risiken für Organismen in Oberflächengewässern der Salat-Spritzpläne in den Projektjahren 2022 bis 2024. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute

Exposition durch Fungizid- und Insektizid-Einträge, dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Wirkstoff. Jeweils rechts für Salatkulturen mit teilweise Spot-Behandlungen (Spot) und zum Vergleich jeweils links für reine Flächenbehandlungen (Fläche). 65

Abbildung 15: Übersicht über die berechneten Kennzahlen und Risikopotentiale für Zwiebelparzellen im PFLOPF Projekt mit der Massnahme 4 Spot-Spraying. Oben: Anzahl komplette Herbizid-Interventionen; Mitte: Applizierte Wirkstoffmenge [kg/ha]; Unten: Berechnete Risikopotentiale (als ETR) für aquatische Organismen durch Wirkstoffeinträge via Drift, Oberflächenabschwemmung und Drainage; Links: 10 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Fläche); Mitte: 5 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Spot Herbizid); Rechts: 1 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden und 4 Spot-Spraying Behandlungen mit Fettsäuren (Spot Fettsäure). 66

Abbildung 16: Je Parzelle durchschnittliche potenzielle Risiken für Organismen in Oberflächengewässern der Herbizid-Spritzpläne auf Zwiebelparzellen im Projektjahr 2024. Risiken berechnet als Exposure Toxicity Ratio (ETR) für akute Exposition durch Herbizid-Einträge und dargestellt je Organismengruppe (aquatische Invertebraten, aquatische Primärproduzenten und Fische), Eintragspfad (Drainage, Drift und Abschwemmung) und Wirkstoff. Links: 10 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Fläche); Mitte: 5 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden (Spot Herbizid); Rechts: 1 Spot-Spraying- und 5 Flächenbehandlungen mit konventionellen Herbiziden und 4 Spot-Spraying Behandlungen mit Fettsäuren (Spot Fettsäure).....67

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Massnahmen, Teilnahmeumfang und Wirkungsziele. 13

Tabelle 2: Einsatz der sieben Technologiemassnahmen (M1–M7) in verschiedenen Kulturen. Angaben in Klammern wurden bei der Auswertung auf Grund des geringen Flächenumfangs nicht berücksichtigt. 15

Tabelle 3: Wirkungsziele und erzielte Einsparungen nach Massnahmen und Anbaurichtungen. Bei grün hinterlegten Feldern wurden die Wirkungsziele erreicht bzw. überschritten, bei braun hinterlegten Feldern wurden sie unterschritten. Bei weiss hinterlegten Feldern trafen die Massnahme bzw. das PSM-Anwendungsgebiet (Herbizide/Fungizide/Insektizide) nicht zu. 19

Tabelle 4: Durch umgesetzte Massnahmen erzielte Einsparungen an PSM in verschiedenen Kulturen und Einschätzung des Potentials im Hinblick auf das Gesamtziel von mindestens 25 % Reduktion. 24

Tabelle 5: Technologien nach Technologiereife und Praxisanwendbarkeit, PSM-Einsparung und Wirtschaftlichkeit. Bei grün hinterlegten Feldern ist ein wirtschaftlicher Einsatz heute möglich, bei braun hinterlegten Feldern noch nicht möglich. 32

Tabelle 6: Anteil der überlappenden Fläche bei manueller und automatischer Schaltung der Teilbreiten. Datenaufnahme auf sechs unregelmässig geformten Parzellen, Spritzenarbeitsbreite 15–22 m. 45

Tabelle 7: Durchschnittliche Anzahl komplette Herbizid-**Interventionen** und applizierte Herbizid-**Wirkstoffmenge** für alle Kulturen und je Kulturgruppe auf den Flächen mit der Massnahme **Hacken** und auf denselben Flächen geschätzte Herbizid-Interventionen ohne Hacken als **Fläche**napplikationen, sowie die entsprechende **Reduktion**. 70

Tabelle 8: Für PEC Berechnungen verwendete Wirkstoffeigenschaften. KOC = Adsorptionskoeffizient. DT50BODEN = Halbwertszeit im Boden. 73

Tabelle 9: Für die ETR-Berechnungen verwendete akute aquatische Toxizitätsendpunkte 75

Tabelle 10: Verhältnis zwischen den Betrieben, die persönlich zu ihren Erfahrungen mit den Massnahmen befragt wurden und allen Betrieben, die Zahlungen für die Anwendung dieser Massnahme erhalten haben. 85

Tabelle 11: Kombinationen der Kantone und Betriebszweige, die am Projekt teilgenommen haben. 86

Tabelle 12: Übersicht über die im Projekt angewendeten Massnahmen. 87

Tabelle 13: Übersicht über die in den verschiedenen Betriebszweigen verwendeten Systeme. 88

Tabelle 14: Auflistung der für Lenksysteme relevanten Grunddaten und resultierenden Kosten. 95

Tabelle 15: Jahreskosten und jährlich Einsparung von Betriebsmittel-, Arbeitszeit- und Traktorkosten eines Lenksystems für einen Ackerbaubetrieb mit 32.5 ha offener Ackerfläche. 96

Tabelle 16: Auflistung der für eine Spritze (21 m) mit automatischer Teilbreitenschaltung relevanten Annahmen und Kosten. 99

Tabelle 17: Kosten für eine Teilbreitenschaltung (TBS) auf einem durchschnittlich grossen Betrieb vom Betriebstyp Ackerbau (32,5 ha OAF) nach der Einkommensstatistik von Agroscope (Hoop et al., 2024). 100

Tabelle 18: Vergleich der Verfahrenskosten für eine Herbizidbehandlung eines Hektars Zwiebeln: Anbaufeldspritze (15 m Arbeitsbreite) gegenüber einer Präzisionsspritze mit 300 ha und 85 ha Auslastung. 103

Tabelle 19: Vergleich der Verfahrenskosten für eine Fungizid- und Insektizidbehandlung (Mischung) eines Hektars Eisbergsalat: konventionelle Spritze und auf einem Hackgerät montierte Präzisionsspritze mit unterschiedlicher Auslastung und Anschaffungspreis. 104

Tabelle 20: Vergleich von Kennzahlen verschiedener Hackverfahren mit einer konventionellen Spritze. 107

Tabelle 21: Kosten verschiedener Hackverfahren für eine Überfahrt von Zuckerrüben. Bei Mais fallen die gleichen Kosten an, allerdings sinken die Direktkosten pro Applikation und Hektar auf 120 Fr. 108

Tabelle 22: Auflistung der für eine Gebläsespritze und eine Drohne relevanten Kosten und Annahmen. 111

Tabelle 23: Kosten der Verfahren für die Bewirtschaftung von einem Hektar Reben mit Drohne und Gebläsespritze. 112

Tabelle 24: Vergleich der angenommenen zu den im Projekt ermittelten und für die Analyse verwendeten Einsparungen der verschiedenen PFLOPF Massnahmen. 114

Tabelle 25: Vergleich der Anschaffungskosten und des Einsparpotentials der verschiedenen Precision Farming Technologien. 119